

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Výukový model 3D skeneru

Model of 3D Scanner

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Haluska**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Výukový model 3D skeneru**
Model of 3D Scanner
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvoření výukového modelu 3D skeneru řízeného DAQ kartou. Model 3D skeneru bude sloužit jako laboratorní úloha pro procvičování dílčích úloh procesu synchronizovaného řízení pohyblivých částí a měření.

Body zadání:

1. Volba komponent a návrh mechanické konstrukce.
2. Seznámení se s vývojovým nástrojem LabVIEW.
3. Návrh koncepce celé SW aplikace s přihlédnutím k použitelnosti pro výuku.
4. Implementace algoritmů navržených úloh.
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] ERTUGRUL, Nesimi. *LabVIEW for electric circuits, machines, drives, and laboratories*. 1. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2002. ISBN 0130618861.
[2] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabView advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, 499 s. ISBN 0-8493-3325-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

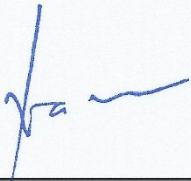
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

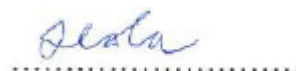

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



Bc. Marek Haluska

Datum odevzdání práce 30.4.2018

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D za jeho pomoc, cenné rady a připomínky k vypracování této práce.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je návrh a realizace výukového 3D skeneru. Objekt je snímán pomocí laserového senzoru využívajícího 1D triangulace. Sběr a zpracování signálu řídí platforma NI myRIO 1900. Součástí práce je rozbor jednotlivých typů skenerů a zaměřuje se především na popis reflexních typů. Pro realizaci skeneru byla vytvořená mechanická konstrukce, jejíž součástí jsou dva krokové motory, platforma myRIO 1900 a sestava lineárního posunu. Aplikace pro řízení skeneru byla vytvořena v programovacím prostředí LabVIEW. Vytvořený skener je ve výsledku samostatné přenositelné zařízení.

Klíčová slova

1D triangulace, 3D skener, LabVIEW, STL, NI myRIO, OPTO NCDT-1320, digitalizace, FPGA, Real-Time

Abstract

The thesis' topic is design and realization of educational 3D scanner. Object is scanned by laser sensor which uses 1D triangulation. NI myRIO 1900 platform controls signal collection and its processing. Part of this work is analysis of different types of scanners and it is focused primarily on description of reflective types of scanners. Mechanical construction was designed for scanner realization. It includes two stepper motors, platform myRIO 1900 and linear movement system. Application for scanner control was created in LabVIEW development environment. Completed scanner is independent and portable device.

Key words

1D triangulation, 3D scanner, LabVIEW, STL, NI myRIO, OPTO NCDT-1320, digitization, FPGA, Real-Time

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1. Teorie problematiky	12
1.1. Seznámení se s problematikou 3D skenerů	12
1.2. Reverzní inženýrství, digitalizace	13
1.3. Rozdělení 3D skenerů	13
1.3.1. Kontaktní skenery.....	14
1.3.2. Bezkontaktní skenery	15
1.4. Metody digitalizace 3D objektu	20
1.4.1. Optická interferometrie	20
1.4.2. Metoda měření doby letu světla	20
1.4.3. Triangulace.....	21
2. Projekty na téma 3D skenování.....	23
3. Volba komponent a návrh mechanické konstrukce.....	26
3.1. Návrh mechanické konstrukce	27
3.2. Krokový motor a lineární posuvná soustava	28
3.3. Platforma NI myRIO-1900.....	30
3.4. Kompaktní laserový snímač polohy OptoNCDT 1320	32
3.5. Napájecí zdroj IBM FRU P/N 49G2196, a proximity senzor	34
3.6. DPS pro propojení NI myRIO s komponenty, ukázka kompletní konstrukce	35
4. Seznámení se s vývojovým nástrojem LabVIEW	38
5. Návrh a realizace celé SW aplikace s přihlédnutím k použitelnosti pro výuku	40
5.1. Popis kompletní SW aplikace.....	41
5.2. FPGA VI	43
5.3. Real-Time VI.....	45
5.4. PC-HOST VI	47
6. Zhodnocení dosažených výsledků.....	55
6.1. Testování 3D skeneru.....	55
6.2. Zhodnocení výsledků	58
Závěr.....	60

Zdroje	61
Seznam příloh.....	64

Seznam použitých zkratek

CCD – Chage Coupled Devided

CMOS – Complementary Metaloxid Semiconductor

DPS – deska plošných spojů

FPGA – Field Programmable Gate Array

STL – stereolithography

VI – Virtual instrumentation – Virtuální instrument, program vytvořený v programu LabVIEW

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka přenosného 3D skeneru, MAKERBOT DIGITIZER [5]	13
Obr. 2 Rozdělení 3D skenerů [7]	14
Obr. 3 Ukázka dotykového skeneru [9]	15
Obr. 4 Princip rentgenového skeneru [10]	16
Obr. 5 Ruční laserový skener, handySCAN 3D [12]	17
Obr. 6 Stereoskopický systém. P- reálný bod; f- ohnisková vzdálenost; U(L, R)- souřadnice bodu P v 2D obrazu získaném levou nebo pravou kamerou; d- vzdálenost mezi kamerami	19
Obr. 7 Blokové schéma interferometru [13]	20
Obr. 8 Triangulační trojúhelník (1D triangulace)	22
Obr. 9 Ukázka 3D skenu,[23]	23
Obr. 10 Laserový 3D skener využívající dvojici laserů, [24]	24
Obr. 11 a) Skenovaný objekt pomocí jednoho laseru; b) Skenovaný objekt pomocí dvou laserů[24]	24
Obr. 12 3D skenovací systém využívající metody měření doby letu světla	25
Obr. 13 Schematické uspořádání navrhovaného 3D skeneru	26
Obr. 14 Návrh mechanické konstrukce	27
Obr. 15 Krokový motor NI-ISM-7400E s integrovaným řídicím obvodem	28
Obr. 16 Krokový motor, SLW-BB-PT-1040-200	29
Obr. 17 NI myRIO-1900 [19]	30
Obr. 18 Architektura LabVIEW RIO [20]	31
Obr. 19 Propojení jednotlivých vrstev architektury LabVIEW RIO [21]	32
Obr. 20 Znázorněná funkce snímače při měření vzdálenosti předmětu [22]	33
Obr. 21 Infračervený detektor překážek	35
Obr. 22 DPS pro připojení komponent k platformě myRIO 1900	36
Obr. 23 Kompletní konstrukce výukového 3D skeneru	36
Obr. 24 Blokové schéma propojení hardwarových komponent	37
Obr. 25 Části virtuálního instrumentu	38
Obr. 26 Ukázka project exploreru s vyznačením prvků	39
Obr. 27 Vývojový diagram kompletní aplikace	42
Obr. 28 Princip rotačního enkodéru. CW-ve směru hodinových ručiček, CCW-proti směru hodinových ručiček	43
Obr. 29 Generátor pulzů	44
Obr. 30 Smyčka pro detekci koncové polohy lineárního posunu	44
Obr. 31 Zobrazení uživatelského rozhraní FPGA programu	45
Obr. 32 Výpočet výšky posuvné části lineárního posuvníku	46
Obr. 33 Real-Time VI	47
Obr. 34 Vývojový diagram kalibračního procesu	49
Obr. 35 Uživatelský panel programu pro manuální ovládání a nastavení parametrů skenování	50
Obr. 36 Podprogramy skenovacího procesu spolu s jednotlivými SubVI	51
Obr. 37 Ukázka průběhu skenování	51
Obr. 38 Vývojový diagram podprogramu pro skenování	52
Obr. 39 SubVI pro posun lineárního posunu do výchozí pozice	54

Obr. 40 Vlevo: původní objekt, vpravo: naskenovaný objekt ve formátu *.STL-----	56
Obr. 41 Vlevo: kalich naskenovaný pomocí skenu HandyScan – EXAscan, vpravo: kalich naskenovaný pomocí vytvořeného skeneru -----	58
Obr. 42 Naskenovaný objekt se slepými místy-----	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry krokového motoru NI-ISM-7400E	30
Tabulka 2 Parametry laserového snímače vzdálenosti optoNCDT 1320.....	34
Tabulka 3 Parametry zdroje IBM FRU P/N 49G2196	34
Tabulka 4 Parametry infračerveného detektoru překážek	35
Tabulka 5 Propojení jednotlivých komponent s platformou myRIO-1900.....	37
Tabulka 6 Porovnání průměru prvního objektu s jeho skenem.....	55
Tabulka 7 Porovnání výšky prvního objektu s jeho skenem.....	56
Tabulka 8 Porovnání průměru druhého objektu s jeho skenem	56
Tabulka 9 Porovnání dvou skenerů, pomocí porovnávání řezů	57

Úvod

Převádění fyzických objektů do digitální podoby pomocí různých typů skenerů nachází využití v širokém spektru oborů. Od lékařství, kde se může používat pro vytvoření protéz přímo na míru daného pacienta, až po herní průmysl, kdy se skenují reálné postavy pro co nejreálnější modely. 3D skenování není novou technologií, ale lze díky němu lépe pochopit vnější nebo vnitřní (záleží na typu skeneru) strukturu objektu. Reverzní inženýrství je proces využívající skenery pro odкрыtí principu snímaného předmětu (např. automobilový díl), za účelem sestrojení stejně či podobně fungujícího předmětu.

Teoretický rozbor je rozdělen do dvou samostatných kapitol. První teoretická kapitola obsahuje popis jednotlivých typů skenerů. Ty se dělí do dvou hlavních skupin, kontaktní a bezkontaktní, které jsou dále tříděny do podskupin. Nejpoužívanější skenery patří do kategorie reflexivních, kterým je věnován největší prostor. Jejich součástí je skener využívající laserového paprsku, který byl využit při výrobě výukového 3D skeneru. Součástí první kapitoly je také popis metod digitalizace se zaměřením na metodu triangulace. Druhá kapitola obsahuje souhrn nejzajímavějších výzkumných projektů na téma 3D skenování.

Následující čtyři kapitoly spadají do praktické části diplomové práce. Třetí kapitola obsahuje návrh mechanické konstrukce, který byl realizován pomocí studentské verze programu AUTODESK INVENTOR 2017. Veškeré komponenty použité pro sestrojení 3D skeneru jsou v kapitole popsány, nejvíce však kompaktní laserový snímač polohy mikroEpsilon OptoNCDT 1320. Ten je použit pro snímání požadovaného objektu a dává informaci o jeho poloměru. Pro sběr a zpracování všech signálů byla zvolena platforma NI myRIO 1900. Zadáním diplomové práce je navržení výukového modelu 3D skeneru, řízeného pomocí DAQ měřicí karty. Rozhodnutím vedoucího diplomové práce bylo řízení skeneru implementováno na moderní platformě myRIO od společnosti National Instruments, která se pro řízení skeneru ukázala jako vhodnější. Skener je primárně určen pro studenty jako ukázka synchronizovaného procesu řízení pohyblivých částí a jejich měření.

Následuje popis vytvořené softwarové aplikace, která byla naprogramována pomocí programu firmy National Instruments LabVIEW, který je popsán v kapitole čtyři. Úkolem aplikace je řízení a sběr dat z použitých komponent. Klíčovou součástí práce je návrh a realizace algoritmu pro vykreslení snímaných dat do spojitého 3D grafu. Návrh koncepce celé softwarové aplikace je řešen v kapitole pět.

V závěrečné kapitole jsou zhodnoceny výsledky práce. Kapitola obsahuje rozbor naskenovaných objektů se zhodnocením výhod a nevýhod použité metody.

1. Teorie problematiky

1.1. Seznámení se s problematikou 3D skenerů

Skener je hardwarové vstupní zařízení, které slouží k převodu obrazové předlohy (2D nebo 3D) do digitální podoby. Ve většině 3D skenerů je princip metod založen na snímání jednotlivých bodů povrchu snímaného objektu a vytvoření tzv. mračka bodů¹. Tyto body se následně převedou na geometrický model v tzv. polygonální síti. Pomocí sítě dojde k rekonstrukci obrazové předlohy a získání prostorového modelu (v daném softwaru). K získání jednotlivých bodů slouží velké množství technologií, např. lasery, dotykové snímače, rentgeny, kamery. Body jsou definovány třemi souřadnicemi (X,Y,Z). Podle použitých technologií jsou odvozeny názvy metod skenování, např. optické, laserové, ultrazvukové, mechanické. Skenery nalézají využití v mnoha odvětvích, např.: [1],[2]

- ortopedie² a protetika³ – získání přesného skenu části těla, podle kterého dojde k výrobě dokonale přizpůsobené protézy. Při návrhu invalidního vozíku dojde k rekonstrukci 3D modelu páteře, což velice zjednoduší práci a dokonale vyhovuje potřebám jednotlivce
- filmový a herní průmysl – 3D skenování postav pro reálnější modely
- 3D dokumentace historických památek – používají se laserové skenery (princip vysvětlen v následujících podkapitolách)
- kontrola kvality výroby – kontrola, zda daný výrobek odpovídá teoretickému modelu, který navrhl konstruktér
- ergonomie – vytváření ergonomicky správně tvarované židle, automobilového sedadla, počítačové myši nebo klávesnice
- dentální aplikace – velmi efektivní způsob opravy zubů. Pomocí skenování se vymodeluje požadovaný implantát. V současnosti existují skenery, které pracují na principu optického skenování a umisťují se přímo do ústní dutiny, kde se pomocí postupného natáčení proskenuje ústní oblast
- kriminalistika – používají se v oblasti forenzních věd k provedení podrobné studie místa činu
- automobilový průmysl – může se stát, že firma potřebuje zakomponovat výrobek do již vyrobené sestavy (např. přídatná nádrž). Provede se rekonstrukce (pomocí 3D skeneru) sestavy, kterou pak konstruktér použije pro odměření přesné polohy pro nový výrobek. [3],[4]

V současnosti je možné naskenované modely znovu zrekonstruovat, a to po pomoci metody 3D tisku. Jedná se o technologii, která využívá data 3D modelu pro jeho rekonstrukci. Nejčastěji používaný formát pro 3D tiskárny je *.STL (stereolitografie)⁴.

¹ Mračno bodů: oblak bodů v 3D prostoru reprezentovaných souřadnicemi X,Y,Z.

² Ortopedie: chirurgický obor, zabývající se léčbou a prevencí poruch pohybového a podpůrného aparátu

³ Protetika: obor, zabývající se léčbou pacientů vybavených protézou

⁴ Stereolitografie: metoda vytváření objektů pomocí postupného vytvrzování polymerů.



Obr. 1 Ukázka přenosného 3D skeneru, MAKERBOT DIGITIZER [5]

1.2. Reverzní inženýrství, digitalizace

Důležitý pojem v rámci problematiky skenování je digitalizace. Jedná se o převod snímaných souřadnic objektu do počítačového systému (CAD systém⁵), kde dochází k jejich úpravě a zobrazení. Tato data jsou připravena k dalšímu zpracování, např. vytvoření formy pro vytvoření kopie objektu.

Reverzní inženýrství, jehož součástí je digitalizace, je proces opačný ke klasickému výrobnímu procesu, který se skládá:

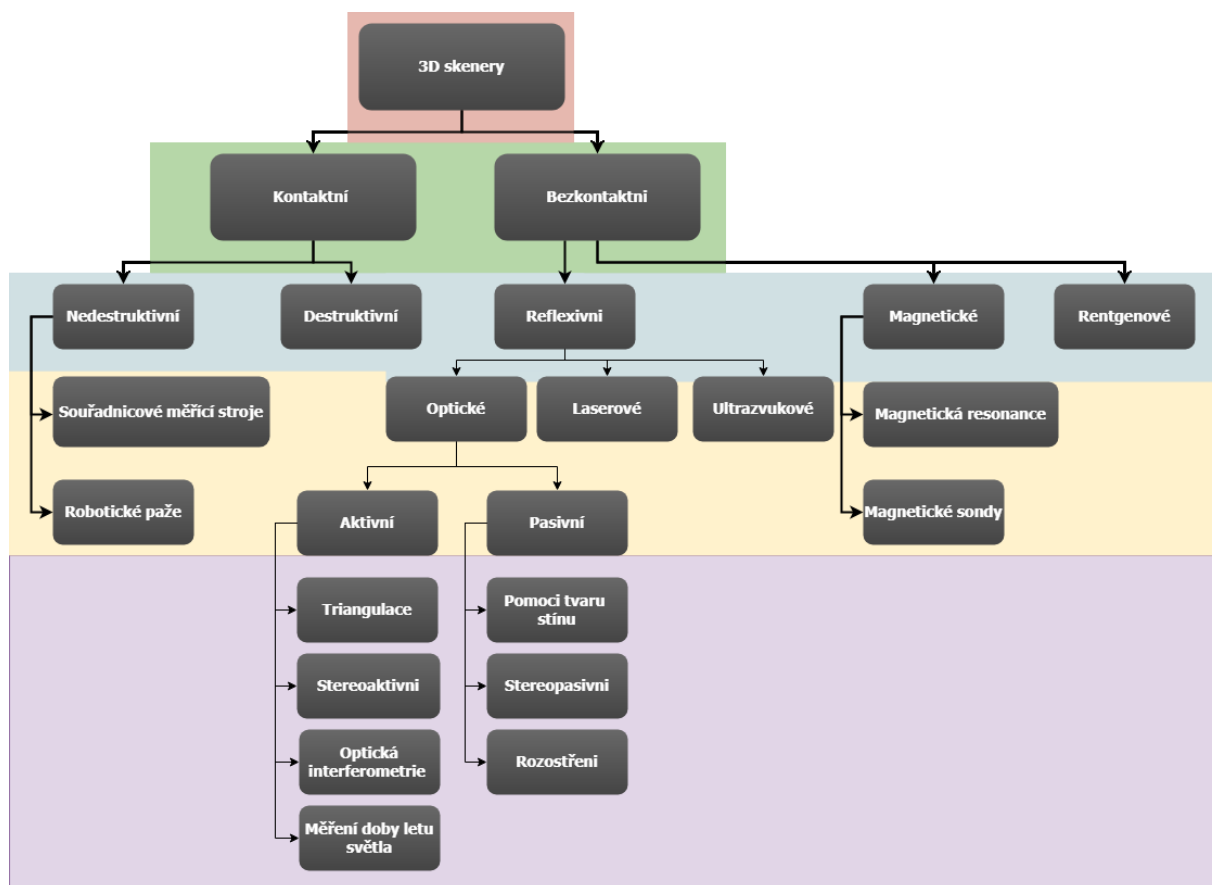
1. Návrh konstrukce – např. CAD programy, kde se vytvoří konstrukce modelu nebo ruční výkresy
2. Výroba – vhodná volba technologie výroby
3. Samotný výrobek

V reverzním inženýrství se pomocí vhodně zvolené metody výrobek naskenuje a zdigitalizuje. Tím se získá jeho CAD model.

1.3. Rozdělení 3D skenerů

Základní rozdělení 3D skenování je na kontaktní skenery a bezkontaktní skenery, podle toho, jestli se skener objektu dotýká nebo nikoliv. Dále se tyto hlavní skupiny dělí do podskupin. Nejpoužívanější skenery patří do kategorie reflexivních. Rozdělení skenerů lze vidět na Obr. 2. [6]

⁵ CAD systém: Computer aided design, počítačem podporované projektování



Obr. 2 Rozdělení 3D skenerů [7]

Metod 3D skenování je celá řada a nedá se s jistotou říct, která z nich je nejlepší. Každá se uplatňuje v jiné oblasti, kde uplatní své výhody. Následující podkapitoly obsahují popis jednotlivých metod.

1.3.1. Kontaktní skenery

Kontaktní skenery potřebují k získání bodů fyzický kontakt se skenovaným objektem. Často se používají v kombinaci s optickými skenery. Patří k nejstarším metodám, které se používaly k digitalizaci skenovaných objektů. Kontaktní metody jsou dražší než bezkontaktní z důvodu nutnosti specializovaného hardwaru pro snímání. Dělí se na destruktivní a nedestruktivní.

Destruktivní skenery

Jedná se o atypický skener, protože se v podstatě jedná o frézu s kamerou. Během destruktivního skenování dochází ke zničení skenovaného objektu, ale výhodou je naskenování vnitřní struktury předmětu. Tyto skenery nejsou vhodné pro skenování cenností, památek, unikátních součástí. Na začátku se měřený předmět zalije do bloku, aby pomocný materiál zatekl do všech dutin. Jeho barva musí být kontrastní oproti skenovanému předmětu. Tento blok se postupně odfrézovává a vzniká sada 2D fotografií s informací o výšce pořízení. Z fotografií se softwarově vyextrahuje okrajová křivka (z přechodu předmětu a pomocného materiálu). Křivka je reprezentována jako body v rovině, při jejich spojení vznikne 3D bodový mrak. [3]

Nedestruktivní skenery

Během nedestruktivního skenování není skenovaný objekt zničen. Skenuje se pomocí fyzického dotyku. Objekt je připevněn k podložce a polohovací rameno, které má na sobě připevněnou sondu (bodová nebo kuličková), projíždí každý jeho bod. Ovládání ramene je ruční, automatické nebo softwarové.

Do této skupiny skenerů patří:

- Mechanicky řízené 3D skenery – jedná se o nejstarší metodu skenování, kterou lze do jisté míry realizovat na každém souřadnicovém měřicím stroji. Hrot s kuličkou je upnutý k měřicí hlavě, která obsahuje citlivé snímače reagující na vychýlení hrotu při dotyku kuličky s předmětem. Během každého vychýlení dojde k záznamu aktuální polohy os měřicího stroje, tyto hodnoty jsou použity pro výpočet středu kuličky. Každý dotek tedy zaznamená 1 bod. Z toho vyplývá, že se jedná o velmi zdoluhavý proces. V dnešní době se používají jen ve výjimečných případech. [3]
- Robotické paže – provoz skeneru je zautomatizován. Využívá se např. pro kontrolu kvality v provozu nebo pro skenování v nebezpečných prostorách.
- Souřadnicový měřicí přístroj – složitý měřicí systém, který realizuje měření v rovině nebo v prostoru v dané souřadné soustavě, s možností plné automatizace měření i vyhodnocování. [8]



Obr. 3 Ukázka dotykového skeneru [9]

1.3.2. Bezkontaktní skenery

Bezkontaktní skenery nepotřebují k získání informace o 3D bodě fyzický kontakt se snímaným předmětem. V současnosti jsou nejpoužívanějším typem z důvodu své jednoduchosti a rychlosti skenování. Kontaktní senzory nahrazují například kamerami. Následuje podrobnější popis bezkontaktních metod.

Magnetické skenery

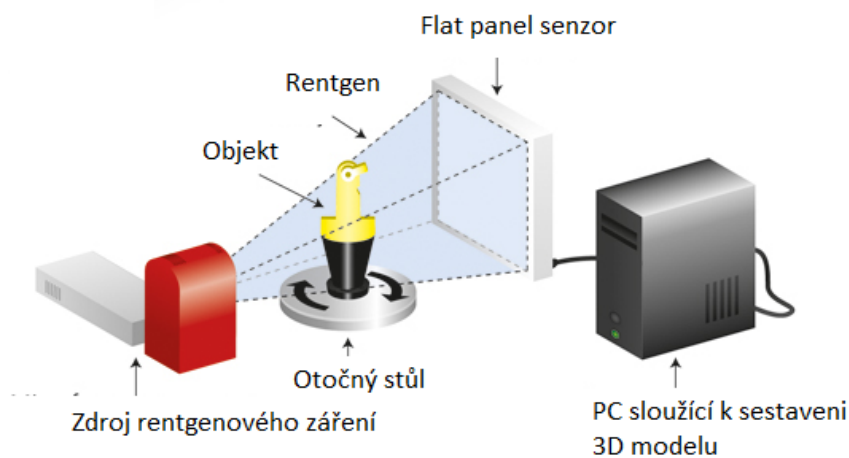
Magnetické skenery pracují na podobném principu jako magnetická rezonance používaná ve zdravotnictví. Pomocí vnějšího magnetického pole se objekt zmagnetizuje a poté se pomocí cívky měří remanentní (zbytkové) magnetické pole snímaného objektu. Tím se na cívce indukuje napětí. Pomocí tohoto způsobu lze naskenovat i vnitřek objektu. Tento skener je podobný jako přístroj popsany výše v podkapitole 1.3.1 v tom, že taky dává informaci o vnitřní struktuře objektu.

Ultrazvukové skenery

Ultrazvukové skenery využívají principu bezkontaktního snímání povrchu objektu sondou, která emituje zvukové vlnění (nad 20 kHz – maximální rozsah lidského sluchu). To je emitováno pomocí ultrazvukové sondy. Samotné skenování je manuální, pomocí pistole s kovovým hrotem, která se přikládá ke snímanému objektu. Stlačením spouště pistole je vyslán ultrazvukový signál. Tento signál je pomocí přijímače s ultrazvukovými čidly převeden do prostorových souřadnic. Nevýhodou metody je poměrně malá přesnost od 0,3 mm do 0,5 mm. Používají se k vyhledání vad uvnitř objektů (hutní polotovary, odlitky). Sonda vyšle ultrazvukový signál do snímaného objektu. Pokud je objekt homogenní, signál jím projde bez odrazů a vrátí se zpět za určitý čas. Pokud je v materiálu jakákoliv vada, dojde k okamžitému odrazu zpět. Z této informace se určí poloha vady. [3]

Rentgenové skenery

Rentgenové skenery se používají pro získání vnitřní struktury snímaného objektu pomocí rentgenového záření (RTG). Intenzita rentgenového záření je u těchto zařízení vyšší než u klasických rentgenů ve zdravotnictví (kde je intenzita taková, aby neuškodila pacientům). Princip je takový, že objekt uzavřený v komoře, se otáčí a dochází k jeho zrentgenování ze všech stran. K tomu dochází tím, že se na objekt vyšle rentgenové záření a na druhé straně ho zachytí senzor, který měří intenzitu prošlého záření. Podle prošlé intenzity lze určit i materiál objektu. Rentgenový skener je připojen k počítači, který celý proces řídí. Frekvence otáčení objektu je zadána podle toho, kolik je požadováno snímků. Zobrazení měřicího řetězce lze vidět na Obr. 4. [10]



Obr. 4 Princip rentgenového skeneru [10]

Laserové skenery

Laserové skenery jsou často používány pro skenování rozlehlých objektů a prostorů. Proto jsou vhodné pro snímání na velké vzdálenosti. Pracují na stejném principu jako sonar⁶. Jejich přesnost je od milimetrů po centimetry (záleží na vzdálenosti objektu od snímače) a rychlost od tisíců po stovky tisíc měřených bodů za sekundu. Skener nejprve vyšle laserový paprsek kolmo ke snímanému objektu. Paprsek se od něj odrazí a vrátí se zpět do skeneru, kde dojde k vyhodnocení velikosti objektu. Úhel odrazu dává informaci o zakřivení objektu. Tak se získá přesná poloha bodu, která se pošle do počítačového systému pro další zpracování. Skener takto nasnímá celé těleso. Jsou dvě hlavní varianty snímání. Skener krouží kolem objektu nebo je statický a otáčí se snímaný objekt. Poloha skeneru musí být vždy známá (pro výpočet absolutní polohy skenovaných bodů). Pro zjednodušení modelování se často používá fotoaparát nebo digitální kamera, jejichž úkolem je zachytit obraz objektu, který se pak spojí s naměřenými daty.

Výsledná kvalita digitalizace snímaného objektu je daná hustotou, jakou laserový skener pokryl plochu snímaného objektu. Výsledný soubor obsahuje informace o geometrii povrchu tělesa. Poloha bodu se počítá pomocí principů interference, měření doby letu a triangulace, které jsou podrobněji rozebrány v kapitole 1.4.



Obr. 5 Ruční laserový skener, handySCAN 3D [12]

⁶ Sonar: zařízení na principu radaru, které místo rádiových vln používá ultrazvuk

Důležitým parametrem laserových skenerů je vlnová délka. Jsou preferovány skenery s nízkým výkonem a bezpečné pro lidský zrak. Pokud se laser používá společně s CCD⁷ snímačem, je doporučena vlnová délka 670 nm. Ukázka ručního skeneru je na Obr. 5. [3], [11]

Optické skenery

Optické skenery snímají požadovaný objekt z několika úhlů za pomoci optického zařízení. Používá se jednoho nebo více senzoru pro snímání objektu z různých úhlů najednou. Většinou se před samotným měřením na snímaném objektu vyznačí orientační body (referenční), které slouží pro zarovnávání skenů přes sebe při tvorbě 3D modelu. Optické skenery jsou v současnosti nejvíce používané. Snímaný objekt se natáčí dvěma způsoby: [11]

- ručně – objekt natáčí uživatel skeneru
- automaticky – polohovací zařízení, např. krokovací motor

V následujících podkapitolách je souhrn používaných digitalizačních metod, které se dělí na pasivní a aktivní metody.

Pasivní metody optických skenerů

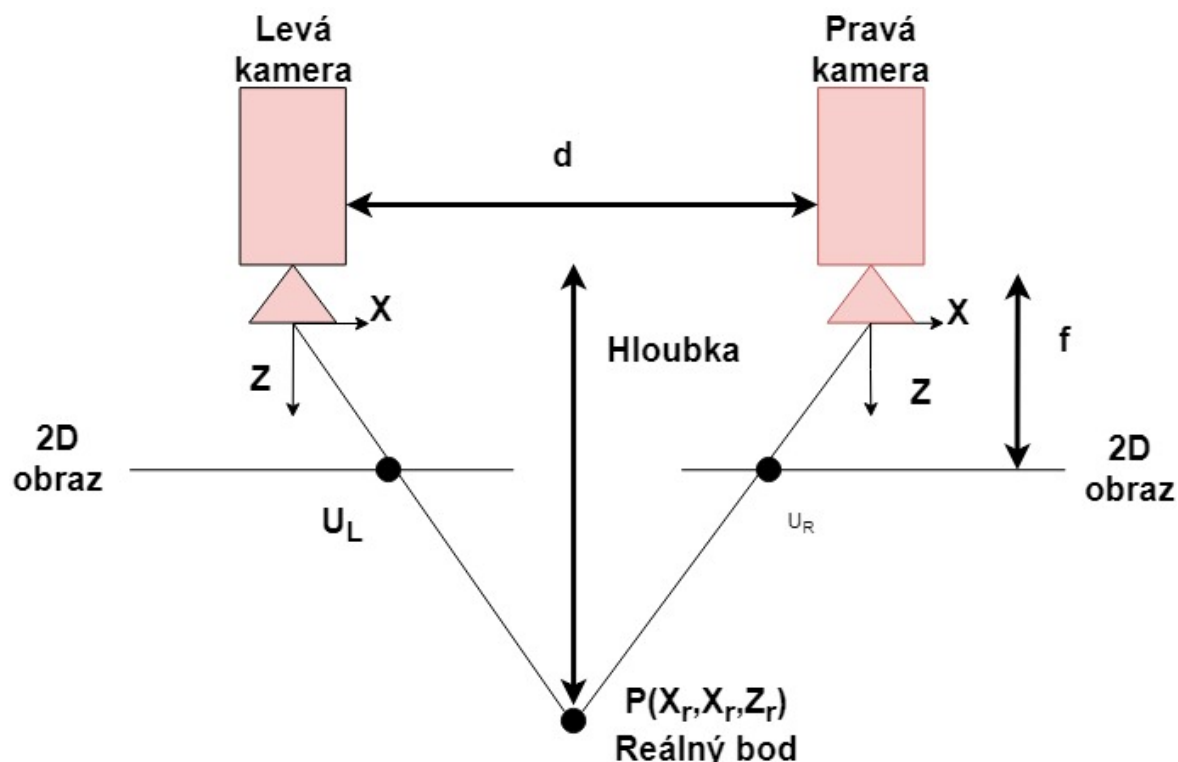
V rámci pasivních metod nedochází k žádnému emitování světelného paprsku na objekt. Energie je pouze přijímána, ne emitována. Základem je nasnímání minimálně dvou snímků kamerou a to při změně polohy snímače nebo při natočení objektu.

Nejvyužívanější pasivní metoda je tzv. stereoskopie. Princip metody spočívá v zachycení obrazu objektu dvěma kamerami, jejichž vzdálenost je přibližně jako rozteč lidských očí. Toto skenování funguje podobně jako lidský zrak. Výsledné souřadnice se získají ze vzájemné orientace kamer a rozdílných pozic bodů zaznamenaných každou kamerou. Největší nevýhoda je ve špatné korespondenci souhlasných bodů v obrazech, které mají nevýraznou texturu nebo hrany. To způsobuje chybu měření, proto se stereoskopické metody používají v kombinaci s aktivními metodami. Ukázka stereoskopické metody je na Obr. 6.

Nejdůležitějším údajem pro výpočet souřadnic reálného bodu je vzdálenost mezi kamerami (d). Se znalostí pozice obou kamer se hledaná oblast zužuje jen na tzv. epipoláru. Je-li určitý bod nalezen na snímku z jedné kamery, leží stejný bod na úsečce druhé kamery, která vznikne jako průmět myšlené spojnice ohniska kamery – nalezený bod ve snímku – označený bod na objektu – nekonečno do obrazové roviny druhé kamery. Bod po bodu lze pak ze dvou daných sdružených stereoskopických snímků určit celý geometrický prostor. Hloubku (vzdálenost kamer od reálného bodu) lze vypočítat podle vztahu (1). [13], [14]

$$Hloubka = \frac{d}{U_L - U_R} \cdot f \quad (1)$$

⁷ CCD: elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace



Obr. 6 Stereoskopický systém. P - reálný bod; f - ohnisková vzdálenost; $U(L, R)$ - souřadnice bodu P v 2D obrazu získaném levou nebo pravou kamerou; d - vzdálenost mezi kamerami

Aktivní metody optických skenerů

U aktivních metod je emitováno určité záření na povrch snímaného objektu. To může být viditelné nebo jakékoliv jiné z elektromagnetického spektra. Senzor emituje záření na snímaný objekt, kde dochází k odrazu zpět do snímače. Mezi výhody aktivních metod patří rychlost snímání a přenositelnost zařízení.

Problém, který vzniká při skenování, je ztráta informace o Z -ové souřadnici. Proto se v aktivních metodách využívá těchto metod digitalizace:

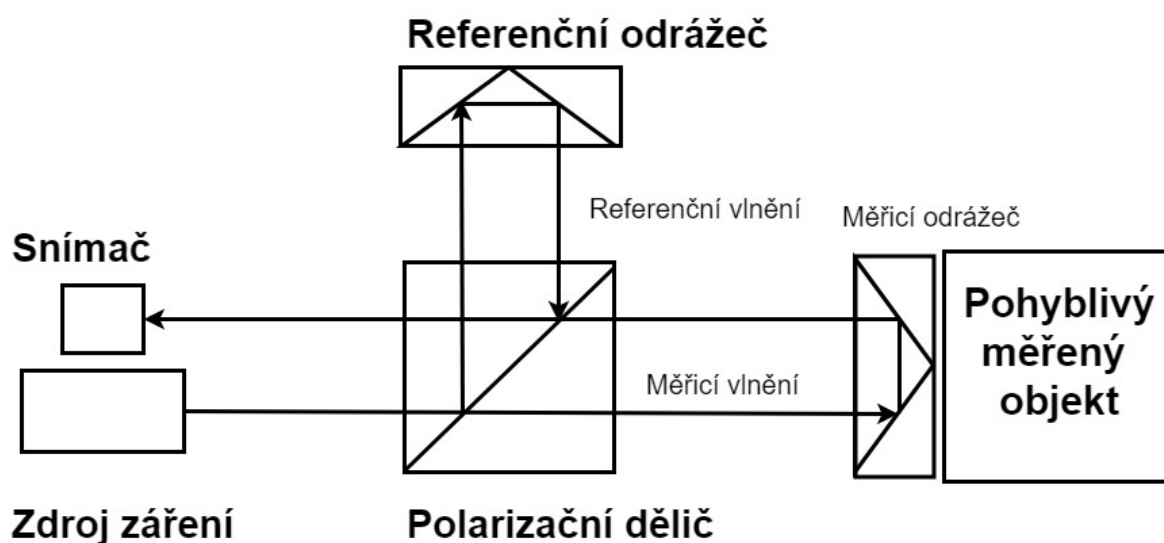
- Triangulace
- Aktivní stereovidění
- Optická interferometrie
- Metoda měření doby letu světla (Time of Flight – ToF)

Následuje popis jednotlivých metod digitalizace.

1.4. Metody digitalizace 3D objektu

1.4.1. Optická interferometrie

Metoda optické interferometrie je založena na principu měření doby letu koherentního záření⁸. Vlnění světelného paprsku se dělí na měřicí a referenční. Obě tyto vlnění se spolu prolínají a výsledek je zachycen snímačem, např. fotodiodou⁹. Během měření se používá vlastností polarizačního děliče a dvou odrazečů. Metoda optické interferometrie umožňuje měřit pouze relativní vzdálenosti snímaných objektů. Měření absolutních vzdáleností lze provést jen po kalibraci. Blokové schéma interferometru lze vidět na Obr. 7. [13]



Obr. 7 Blokové schéma interferometru [13]

1.4.2. Metoda měření doby letu světla

Vzdálenost snímaného objektu (L) lze stanovit z doby letu světelného paprsku. Měří se od jeho vyslání světelným zdrojem až po jeho zachycení snímačem po odražení od snímaného objektu. Vztah je následující:

$$L = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2)$$

- t – čas od vyslání po příjem světelného paprsku
- c – rychlost světla, $299.792 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$

Obvykle se měří doba letu modulovaného optického signálu, který se koreluje s referenčním signálem. Typy modulace optického signálu jsou:

- pulsní
- pseudonáhodná

⁸ Koherentní záření: vycházející z jednoho zdroje, uchovává si stejnou fázi, amplitudu a vlnovou délku na určité vzdálenosti

⁹ Fotodioda: polovodičová součástka, ve které do oblasti P-N přechodu proniká světlo

- spojitá

Rychlost světla je vysoká, proto zařízení využívající metodu měření doby letu světla musí být velice přesné. [13]

1.4.3. Triangulace

Princip triangulace je v současnosti nejpoužívanější metodou digitalizace v optických metodách. Triangulace se dělí do dvou hlavních skupin:

- pasivní triangulace
- aktivní triangulace

Následuje popis jednotlivých skupin

Pasivní triangulace

Jak již bylo řečeno v podkapitole 1.3.2, pasivní metody nemají vlastní zdroj, který emituje záření. Geometrické uspořádání mezi snímačem a zdrojem tedy není známo. Používají se tři základní metody pasivní triangulace:

- více kamer se samokalibrací
- více kamer se známou orientací
- jedna kamera v různých polohách se samokalibrací

Při kalibraci nemusí být známa přesná poloha kamer, ale ze snímku se určí jejich relativní umístění. Často se taky využívá kalibrační předmět, který má všechny rozměry známe a je skenován společně s požadovaným objektem. Tento předmět lze pak nalézt v jednotlivých snímcích a z natočení a změny měřítka předmětu lze určit všechny parametry pro snímání.

Největší nevýhodou těchto metod jsou vlivy prostředí, např. osvětlení měřicího místa, které může být nedostatečné. Pokročilejší zařízení jsou vybavena navíc modulátory intenzity paprsku, což sice zhoršuje podmínky, ale umožňuje uplatnění v širším spektru aplikací.

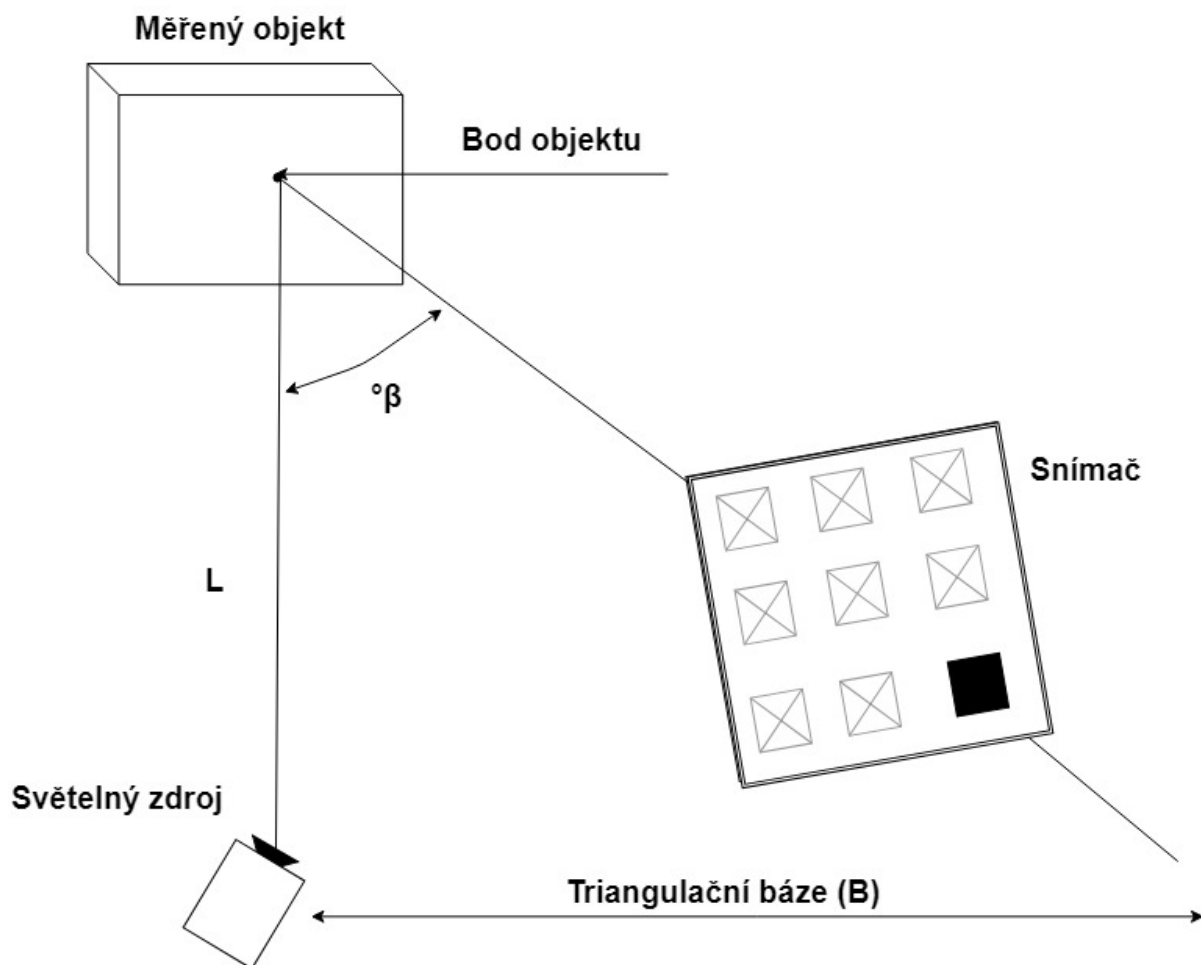
Speciální podskupinou je metoda stereoskopie (metody s více kamerami). Tato metoda je podrobněji popsána v podkapitole 1.3.2. [13]

Aktivní triangulace

Princip aktivní triangulace spočívá v rekonstrukci snímaného objektu ozáření jeho povrchu světelným zdrojem s jeho současným snímáním např. CCD snímačem. Triangulace se dělí na:

- světelný paprsek – 1D triangulace
- světelný pruh – 2D triangulace
- strukturovaný světelný svazek – 3D triangulace

Světelný paprsek a pruh se využívají převážně u laserových skenovacích systémů, kde mají výhodu velké pracovní vzdálenosti. Snímaný bod na objektu, CCD snímač a světelný zdroj společně tvoří triangulační trojúhelník, který lze vidět na Obr. 8.



Obr. 8 Triangulační trojúhelník (1D triangulace)

Triangulační báze (základna) značí spojnici světelného zdroje a snímače. Úhel mezi základnou se stranou světelného zdroje se nemění. Úhel mezi triangulační bází (β) a snímačem je proměnný podle snímaného bodu objektu. Z velikosti tohoto úhlu lze (nutnost znalosti velikosti triangulační báze) určit vzdálenost snímaného bodu objektu od světelného zdroje podle vztahu (3).

$$L = \frac{B}{\tan(\beta)} \quad (3)$$

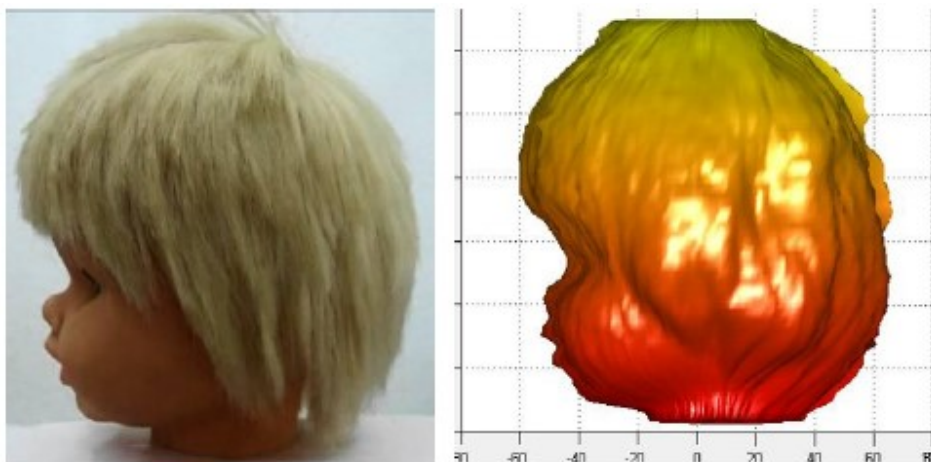
Triangulační princip měření moderních laserových snímačů vychází ze situace, že pokud se paprsek odráží od detekovaného předmětu pod konstantním úhlem, je vzdálenost dopadu odraženého paprsku na čelo senzoru úměrná vzdálenosti detekovaného předmětu od čela senzoru. Nevýhodnocuje se tedy intenzita dopadajícího paprsku či doba jeho letu, ale místo, kam zpět odražený paprsek dopadl. Díky tomu je detekce výrazně spolehlivější a odolnější proti rušení, protože podmínka detekovatelnosti je dána pouze schopností optického přijímače senzoru zaznamenat dopad odraženého paprsku, ať již má jakoukoliv intenzitu větší než minimální. [15]

2. Projekty na téma 3D skenování

V současné době existuje mnoho druhů vytvořených 3D skenerů. Jak v komerční sféře, tak ve vědecké. Do komerční sféry spadá například skener MAKERBOT DIGITIZER, Obr. 1, který využívá principu pruhové laserové triangulace a jeho největší výhody jsou nízká cena (20 000 Kč), přenositelnost a výstupní formát, kterým je *.STL, takže je ideální pro vývojáře, kteří mohou ihned objekty upravovat ve vhodném softwaru a poté tisknout vytvořené modely 3D tiskárnou.

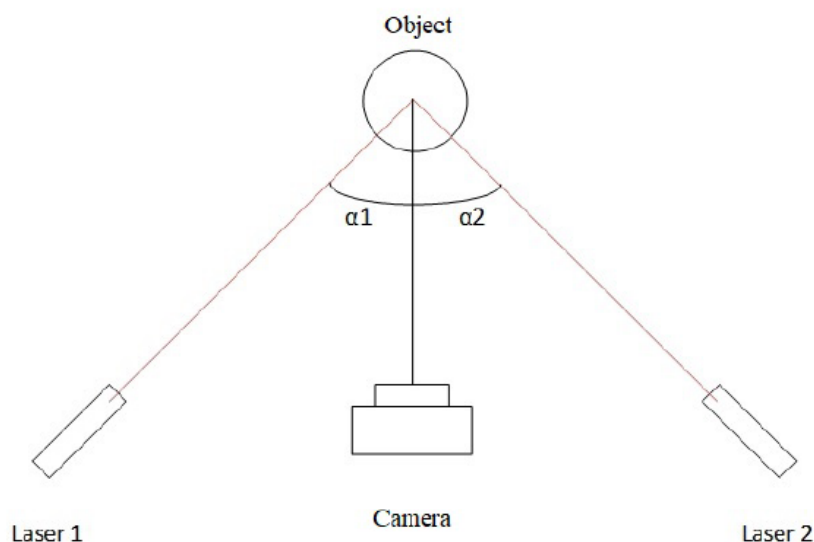
Pro tvoření výukový 3D skener byly mnohem zajímavější výzkumné projekty z důvodu jejich zdokumentování ve vědeckých člancích. Tato kapitola obsahuje souhrn nejzajímavějších řešení. Ne všechna nalezená využití souvisí s 3D skenováním pomocí 1D triangulace, ale vyhledané projekty přispěly k rozvoji vědomostí týkajících se výhod a nevýhod metod 3D skenování a taky jejich využitelnosti.

3D skener tvořený pomocí 1D optického senzoru vzdálenosti, [23], využívá senzor společnosti ifm typ O1D100, který má snímací rozsah 200 mm - 10 000 mm s rozlišením 1 mm. Analogový výstup senzorů může být napěťový (0-10 V) nebo proudový (4-20 mA). Součástí skeneru jsou dva krokové motory. První pro posun optického senzoru vzdálenosti a také pro získání informace o výšce snímaného objektu. Druhý krokový motor otáčí platformou se samotným objektem, kvůli získání jeho řezu. Komunikace a získání signálu z optického senzoru vzdálenosti je řízena jednočipovým mikropočítačem PIC18F4550. Komunikace s PC je pomocí RS-232. Software byl navržen v programu MATLAB od firmy MathWorks a jeho součástí je kalibrace s ohledem na vzdálenost otočné platformy od optického senzoru vzdálenosti. Samotné skenování probíhá asynchronně, druhý krokový motor vykoná jednu otočku platformou, zastaví se a čeká na posunutí optického senzoru po vertikální ose. Tento postup probíhá, dokud optický senzor vysílá data. Pokud optický senzor data přestane vysílat, dojde k ukončení skenování a v programu MATLAB ke složení a vykreslení samotného 3D objektu z dostupných signálů. Cena projektu je kolem 10 000 Kč. Výsledky nejsou příliš přesné z důvodu malého rozlišení optického senzoru, ale pro jednoduché a matné objekty je dostačující. Součástí vyvinutého softwaru není převod dat do *.STL formátu. Ukázka 3D skenu je na Obr. 9. Jeden z hlavních nedostatků projektu je, že není schopen oskenovat náhodný objekt, protože ten může svým tvarem zakrývat některá místa, která 1D optický senzor nemůže zaznamenat a tak vznikají tzv. slepá místa.



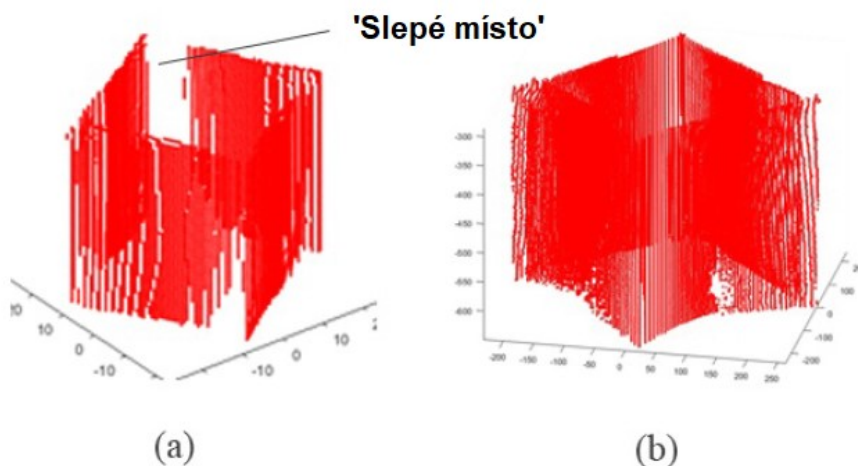
Obr. 9 Ukázka 3D skenu,[23]

Problém s tzv. slepými místy řeší 3D skener,[24] , využívající shlukování mraků bodů, které jsou snímány pomocí dvou laserů a kamery. Schéma lze vidět na Obr. 10. Lasery nejsou bodové, ale pruhové, takže není potřeba posouvat kamery vertikálně, tudíž součástí 3D skeneru je jeden krokový motor otáčející platformou s upevněným objektem. Vzdálenost laserů od kamery je konstantní a úhel, který svírají s ohledem na kameru, je 45° . Jeden ze získaných mraků bodů musí být otočen o 90° (součet úhlů laserů), aby se mohly zkombinovat v jeden výsledný mrak.



Obr. 10 Laserový 3D skener využívající dvojici laserů, [24]

Na začátku skenování dojde k zapnutí prvního laseru a sejmutí bodů. Poté se vypne a druhý laser sejme linii bodů, následně dojde k výpočtu souřadnic a k posunutí karuselu o předem definovaný úhel. To se opakuje, dokud krokový motor neudělá jednu otáčku, pak dojde ke shlukování mraků bodů a zobrazení 3D objektu. Celková přesnost skenování byla 98 % a největší nevýhodou je nutnost počáteční zdoluhavé kalibrace z důvodu získání správných bodů.



Obr. 11 a) Skenovaný objekt pomocí jednoho laseru; b) Skenovaný objekt pomocí dvou laserů[24]

Výsledkem práce řešené v [25], je 3D skener snímající vzdálenost objektu od snímače pomocí metody měření doby letu světla, viz. kap. 1.4.2. Tento skener je velmi podobný systému zmíněnému výše, který využíval 1D optického senzoru vzdálenosti ke snímání bodu snímaného objektu. Obsahuje také dva krokové motory. Jeden pro otáčení objektu a druhý pro jeho posouvání po vertikální ose. Senzor je v tomto případě fixní a pohybuje se jen objekt. Řídící systém byl vytvořen pomocí mikropočítače NoMADA Pro+ a pomocí programu Visual Studio využívající programovací jazyk C++. Měřicí rozsah použitého senzoru (VL53L0X od firmy STMicroelectronics) je 4 mm – 2000 mm. Senzor používá laser typu VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) s vlnovou délkou 960 nm (neviditelný pro lidské oko). VCSEL je typ polovodičového laseru, který je více imunní proti okolnímu světlu než klasický laser. Proto je vhodnější pro větší měřicí rozsahy.



Obr. 12 3D skenovací systém využívající metody měření doby letu světla

Průběh skenování je stejný jako v případě skeneru využívajícího 1D optického senzoru vzdálenosti ke snímání bodu snímaného objektu. Součástí práce je i porovnání dvou typů senzorů, a to IR (Infračervený) a senzoru využívajícího měření doby letu světla. IR senzor nedosahuje přesnosti měření doby letu světla, proto objekty naskenované pomocí tohoto senzoru byly méně přesné.

3. Volba komponent a návrh mechanické konstrukce

V této kapitole jsou popsány zvolené komponenty, které zajišťují řízení navrhovaného výukového 3D skeneru. Nejdříve je popsán návrh mechanické konstrukce. Poté následuje podrobnější rozbor jednotlivých komponent.

Navrhovaný 3D skener využívá laserové 1D triangulace. Schematické uspořádání skeneru lze vidět na Obr. 13. Jedná se o zadaný návrh, podle kterého byla vytvořena konstrukce a vybrány vhodné komponenty.

Princip je následující: krokový motor 1 otáčí platformou, na které je upevněný požadovaný objekt. Tento motor dává informaci o úhlu natočení skenovaného objektu α . Krokový motor 2 pohybuje lineárním posunem, na kterém je umístěn laserový snímač vzdálenosti. Motor číslo dva tedy dává informaci o Z souřadnici.

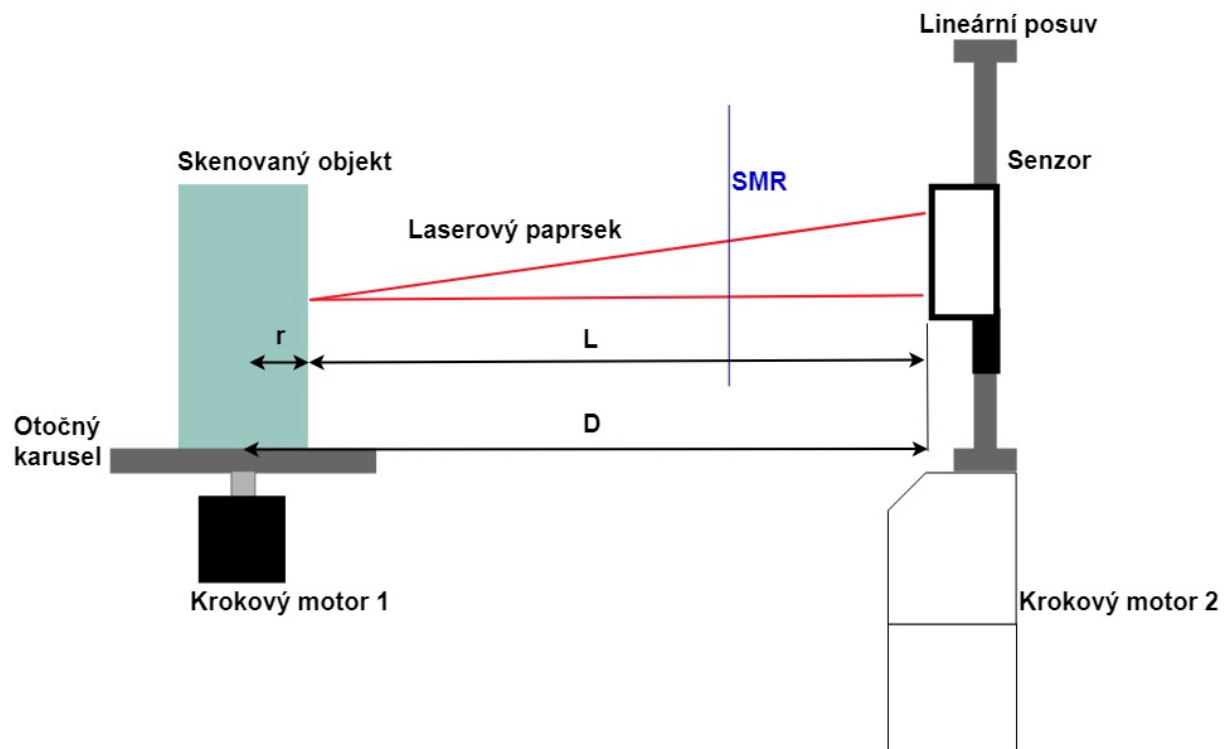
Informace o poloměru snímaného objektu se získá díky známé vzdálenosti středu karuselu od laserového snímače vzdálenosti a vzdálenosti naměřené laserovým snímačem vzdálenosti. Nutnost je znalost SMR, což je začátek měřicího rozsahu laserového snímače vzdálenosti. Vztah je následující:

$$r = D - L \quad (4)$$

D – vzdálenost středu karuselu od laserového snímače vzdálenosti

r – poloměr skenovaného objektu

L – vzdálenost skenovaného objektu od laserového snímače vzdálenosti



Obr. 13 Schematické uspořádání navrhovaného 3D skeneru

Díky znalosti úhlu natočení skenovaného objektu α a poloměru r snímaného předmětu lze dopočítat zbývající souřadnice dle následujících vztahů:

$$X = \cos(\alpha) \cdot r \quad (5)$$

$$Y = \sin(\alpha) \cdot r \quad (6)$$

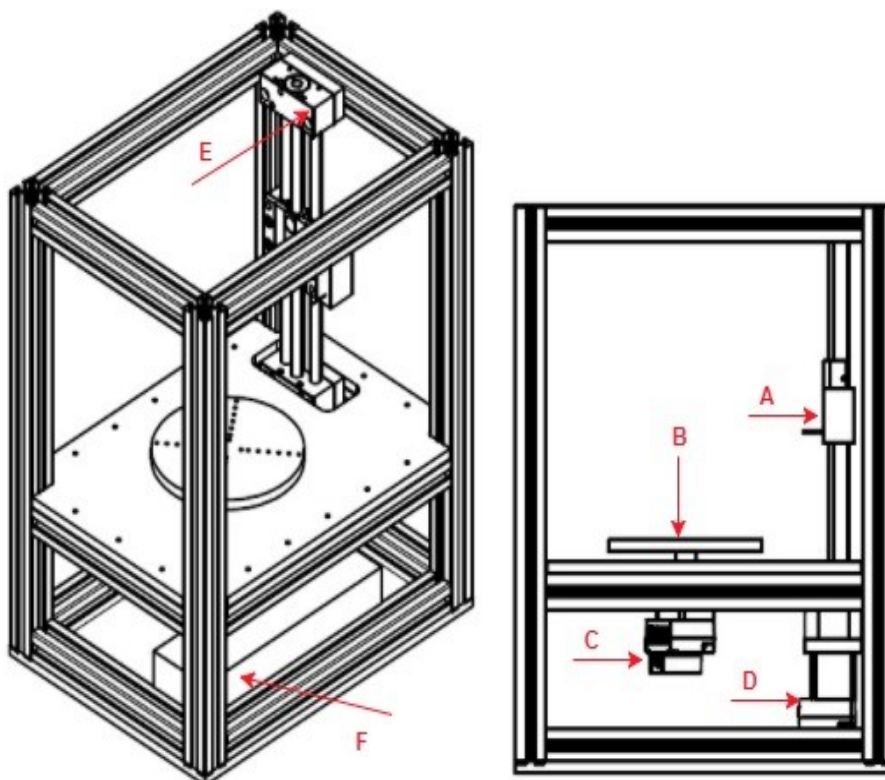
Pomocí souřadnic X , Y a Z lze sestavit sken objektu.

3.1. Návrh mechanické konstrukce

Nejdůležitějším parametrem při návrhu mechanické (nosné) konstrukce byla její velikost. Snahou bylo vytvořit konstrukci co nejvíce kompaktní a přenositelnou. Rozměry jsou (37x27x47) cm, splňují tedy požadavky na velikost. Vytvořený model 3D skeneru je převážně určen pro prezentační účely a pro odzkoušení technologií 3D skeneru v rámci laboratorní úlohy.

Návrh mechanické konstrukce proběhl pomocí programu INVENTOR 2017 od firmy AUTODESK. Byl zde proveden jak návrh nosné konstrukce, tak i návrh ostatních konstrukčních částí.

Důležitým prvkem pro návrh byla otočná platforma, která slouží pro ukotvení snímaného objektu a dále k jeho otáčení pro provedení samotného skenování. Její průměr je 10 cm a výška 10 mm. Ostatní části jsou základová a spodní deska. Základová deska slouží pro ukotvení prvního krokového motoru.



Obr. 14 Návrh mechanické konstrukce

Jako materiál nosné konstrukce byl zvolen hliníkový profil ITEM o straně 30 mm. Jednotlivé profily jsou mezi sebou propojeny pomocí vnitřních spojek. Navrženou konstrukci 3D skeneru spolu s rozmístěním jednotlivých komponent lze vidět na Obr. 14.

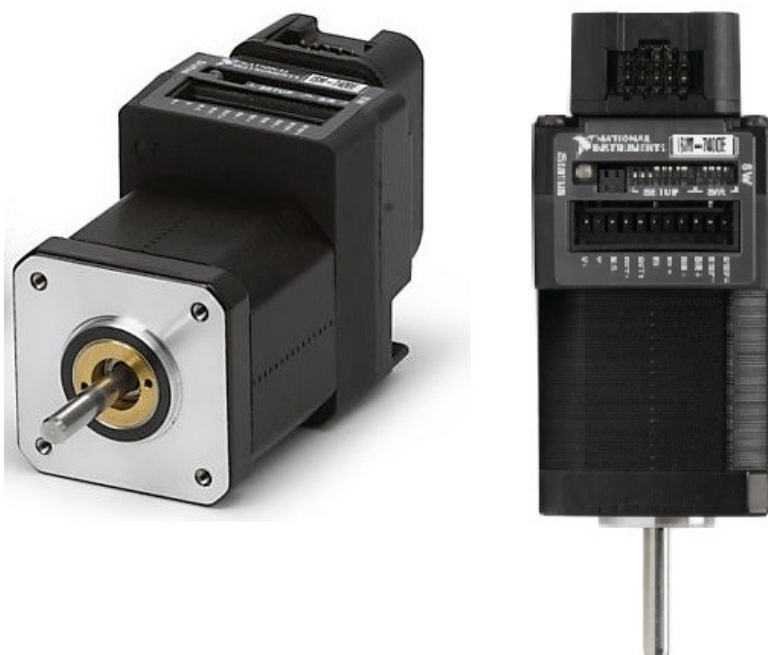
Konstrukce se skládá z otočného karuselu (B), kterým otáčí první krokový motor (C). Lineárním posunem (E) posouvá druhý krokový motor (D). Lineární posun má na sobě upevněn optický senzor (A). Součástí konstrukce je také zdroj napětí (F).

Následuje popis jednotlivých hardwarových a softwarových komponent použitých pro návrh 3D skeneru.

3.2. Krokový motor a lineární posuvná soustava

Krokový motor představuje akční člen pro převedení digitálního vstupního signálu na úhel otočení rotoru. Lze si ho představit jako točivý synchronní motor, v jehož statorovém vinutí není točivé pole generováno sinusovým napájecím napětím, ale je generováno magnetické pole (krokující) vytvářené postupným napájením cívek, které tvoří pólové dvojice, stejnsměrným proudem. Počet poloh rotoru určuje počet kroků na jednu otočku. [16]

Pro pohon lineární posuvné soustavy byl vybrán krokový motor ISM-7400E od firmy National Instruments. Tato firma nabízí různé varianty rozdělené podle kroutícího momentu. Každá varianta má svoje volitelné příslušenství, enkodér nebo dvojitou osu. Vybraný motor ISM-7400E má v sobě integrovanou řídicí jednotku a součástí motoru je také integrovaný rotační enkodér. Krokový motor lze vidět na Obr. 15.



Obr. 15 Krokový motor NI-ISM-7400E s integrovaným řídicím obvodem

Řídicí obvod krokového motoru se nastavuje pomocí dvanáctimístného přepínače typu DIP¹⁰. Pomocí prvních dvou přepínačů lze nastavit proud statorovým vinutím ve čtyřech variantách od 50 % do 100 % jmenovitého proudu. Nastavení 100 % proudu zajistí maximální točivý moment, ale za cenu vyšší teploty motoru. V rámci tvořeného 3D skeneru byl zvolen proud statorovým vinutím na 70 %.

Pomocí třetího přepínače lze nastavit klidový proud, a to ve dvou variantách, 50 % a 90 % jmenovitého proudu. Tímto proudem se nastavuje držící moment motoru, pokud je v klidu, a to s různou účinností. Klidový proud byl nastaven na 50 %, protože ve tvořeném 3D skeneru není vyžadováno vysokého držícího momentu motorů. Nejdůležitějším parametrem je nastavení velikosti kroku na otáčku. Jemnost kroku lze nastavit od 200 do 25600 kroků na otáčku. V rámci tvořeného 3D skeneru bylo zvoleno 25000 kroků na jednu otáčku.

Řídicí obvod má tři hlavní vstupy a jeden výstup. Jedná se o STEP+, STEP-, DIR+, DIR-, EN+, EN-, OUT+, OUT-. Vstupní napětí digitálního signálu je určeno v rozsahu od 5 V do 24 V, kdy jednotlivé vstupy odebírají 10 mA. Tyto vstupy jsou opticky izolovány. Napájení řídicího obvodu je značeno jako V+, V-, a rozsah vstupního napětí je od 12 V do 48 V.

Digitální vstup STEP reaguje na sestupnou hranu digitálního pulzu a při její detekci se motor posune o jeden krok. Pomocí vstupu DIR se určuje směr otáčení motoru. Vstup EN slouží pro povolení funkce řídicího obvodu. Platí zde převrácená logika, pro logickou jedničku je obvod zastavený, pro logickou nulu zapnutý.

Součástí krokového motoru je, jak již bylo zmíněno, rotační enkodér s AB kanálem. Není nijak elektricky propojen s řídicím obvodem, proto musí mít externí napájení 5 V. Integrovaný enkodér odebírá maximálně 59 mA. Všechny výstupy enkodéru jsou diferenční (jeden invertovaný a jeden neinvertovaný výstup). Součástí enkodéru je tzv. indexer¹¹. Ten má hodnotu logické jedničky jednou za otáčku. Kanály AB jsou od sebe posunuty o 180°, což slouží pro určení směru otáčení. Enkodér vrací 1000 pulzů na jeden kanál za jednu otáčku a je napájen pomocí platformy NI myRIO 1900, viz. kapitola 3.3, která je schopna dodat 5 V a dodává maximálně 100 mA. Proto je naprosto vyhovující pro napájení enkodéru.

Lineární posuvná soustava slouží pro realizaci pohybu v jedné ose. Pro tvořený 3D skener byl vybrán lineární posun od firmy Igus SLW-BB-PT-1040-200, viz Obr. 16. [17]



Obr. 16 Krokový motor, SLW-BB-PT-1040-200

¹⁰ DIP přepínač: Dual in-Line package je vícenásobný přepínač zapájený přímo do desky plošných spojů.

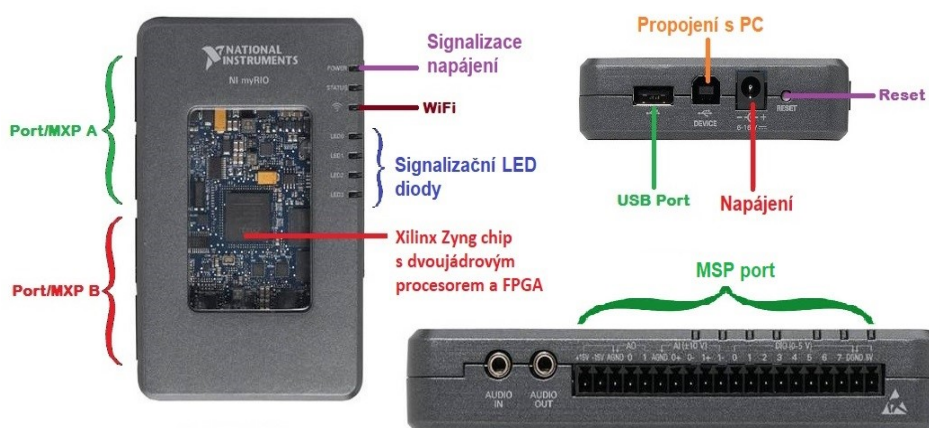
¹¹ Indexer: absolutní značka pozice

Tabulka 1 Parametry krokového motoru NI-ISM-7400E

NI-ISM-7400E		
Řídící jednotka		
	MIN	MAX
Napájecí napětí (V)	12	48
Odběrový proud (A)	1	2
Klidový proud (mA)	160	
Digitální I/O (V)	4	30
Odběrový proud pro dig. I/O při 24V (mA)	10 mA	
Jemnost kroku (-)	200	25600
Enkodér		
Napájecí napětí (V)	5	
Odběrový proud (mA)	56	
Počet pulzů za otočku (-)	1000	

3.3. Platforma NI myRIO-1900

Zařízení myRIO-1900, od firmy National instruments, je přenosné rekonfigurovatelné I/O zařízení, které se využívá například pro řízení krokových motorů. Je založeno na stejné výkonné technologii, jako jeho průmyslová varianta NI CompactRIO. Velkou výhodou jsou jeho malé rozměry a poměrně nízká cena. NI myRIO obsahuje dvoujádrový procesor a programovatelný obvod FPGA (programovatelné hradlové pole) s 28 000 logickými bloky. Součástí platformy jsou analogové a digitální vstupy, výstupy. NI myRIO-1900 se propojuje s počítačem pomocí rozhraní USB nebo bezdrátovým rozhraním 802.11b,g,n. Jeho součástí je i zabudovaný akcelerometr¹². Tuto platformu lze programovat prostřednictvím grafického vývojového prostředí NI LabVIEW.



Obr. 17 NI myRIO-1900 [19]

¹²Akcelerometr: přístroj měřící zrychlení.

Konektory MXP (myRIO Expansion Port) A a B jsou totožné a přenášejí stejné sady signálů. Každý signál má svůj jedinečný název pro jejich softwarové rozpoznání. Analogové vstupy jsou multiplexovány¹³ do jednoho 12 bitového ADC převodníku, který vzorkuje všechny tyto kanály.

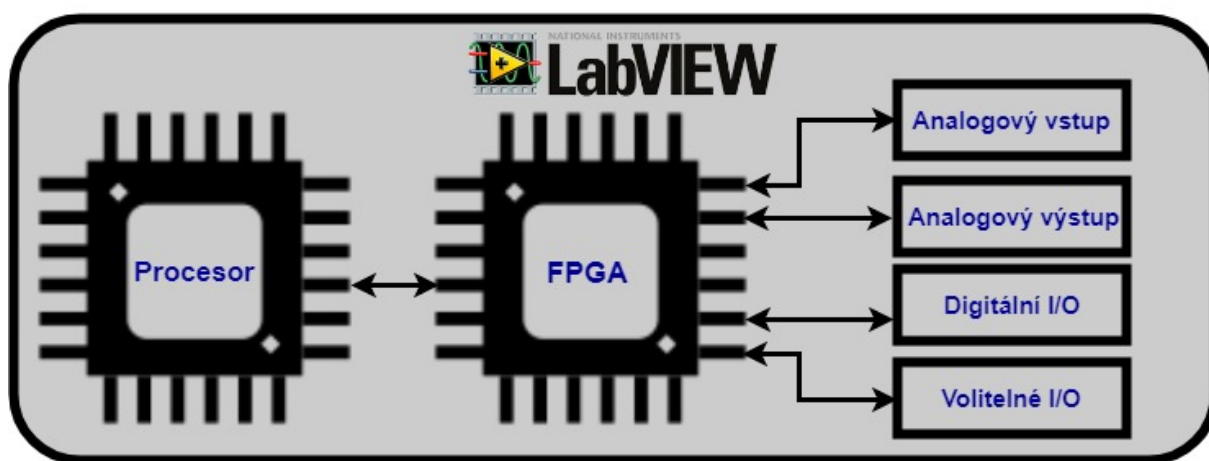
MXP konektory mají každý celkově čtyři analogové vstupy, kde mohou být měřeny signály v rozpětí od 0 V do 5 V. Součástí MSP (mini systém port) jsou dva vysokoimpedanční diferenciální analogové vstupy, kde mohou být měřeny signály v rozpětí ± 10 V.

NI myRIO-1900 má univerzální DIO linky s logikou 3,3 V na všech třech konektorech. Na MXP konektorech DIO linky 0-13 obsahují interní pull-up rezistor 40 k Ω . DIO linky 14-15 mají pull-up rezistor 2.2 k Ω . MSP konektor C má osm DIO linek. Každá MSP DIO linka má 40 k Ω pull-down rezistor. Všechny linky lze jednotlivě naprogramovat jako vstupy nebo výstupy. MXP porty obsahují taky speciální digitální funkce např.: generátor PWM (pulzně šířková modulace).

Jak již bylo zmíněno, NI myRIO 1900 se skládá ze dvou hlavních částí. Dvoujádrového procesoru, na kterém běží Real-Time řízení a FPGA, které obsluhuje a zpracovává vstupní a výstupní signály. [18]

Architektura LabVIEW RIO

LabVIEW RIO architektura kombinuje Real-Time procesory, uživatelsky programovatelné FPGA a modulární I/O s jednotným softwarovým prostředím, které může být použito k programování a přizpůsobení každého jednotlivého prvku systému. Jedna z jeho schopností je možnost propojit se s různými typy snímačů nebo speciálními I/O. Mezi další vlastnosti patří pokročilé zpracování signálu nebo programování pokročilých řídicích algoritmů. Kvůli těmto vlastnostem je tato architektura vhodná pro ovládání pokročilých řídicích systémů. Proto bylo NI myRIO 1900 vybráno pro řízení tvořeného 3D skeneru.



Obr. 18 Architektura LabVIEW RIO [20]

Součástí LabVIEW RIO architektury jsou čtyři složky:

- Real-Time procesor

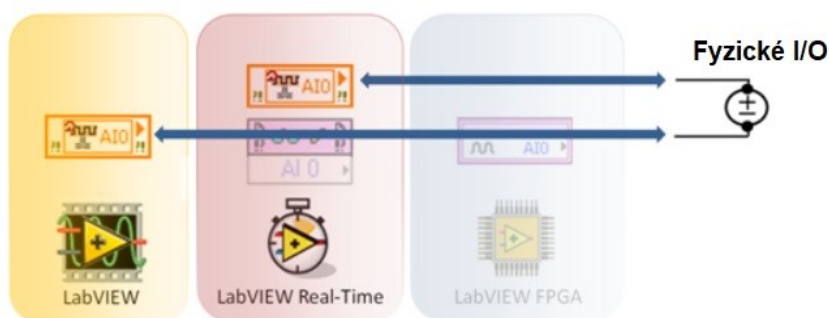
¹³Multiplexování: proces, ve kterém je více analogových signálů nebo digitálních datových toků kombinováno do jednoho signálu

- uživatelsky programovatelné FPGA
- modulární I/O
- softwarový řetězec nástrojů pro naprogramování každého jednotlivého aspektu z architektury

Rekonfigurovatelné FPGA se používá hlavně k přesunutí časově kritických nebo náročnějších úkolů z procesoru právě na FPGA, protože poskytuje spolehlivé a deterministické¹⁴ provedení kódu. FPGA je přímo spojené s I/O linkami pro vysokorychlostní zpracování signálu.

Díky přímému spojení FPGA s I/O je latence¹⁵ řídicí smyčky prakticky nulová, proto je vhodná pro většinu pokročilých řídicích algoritmů. Softwarové prostředí obsahuje kompletní sadu vestavěných matematických a analytických funkcí, dále algoritmy pro zpracování signálu a obrazů. [20]

LabVIEW FPGA modul umožňuje programovat hradlová pole v grafickém programovacím prostředí bez znalosti VHDL¹⁶. Zobrazení propojení jednotlivých vrstev architektury lze vidět na Obr. 19. Vlevo je vývojové prostředí LabVIEW, které je nainstalováno např. na osobním počítači. Toto prostředí obsahuje kompletní sadu matematických a analytických funkcí pro zpracování signálu z I/O.



Obr. 19 Propojení jednotlivých vrstev architektury LabVIEW RIO [21]

3.4. Kompaktní laserový snímač polohy OptoNCDT 1320

OptoNCDT 1320 výrobce mikroEpsilon je laserový triangulační senzor pro měření posunutí, vzdálenosti a polohy. Tento senzor je velmi malý, má v sobě integrovanou řídicí jednotku a nastavitelnou vzorkovací frekvenci od 250 Hz do 2 kHz. Automatická kompenzace povrchu materiálu (ATC) zajišťuje řízení stabilní vzdálenosti signálu bez ohledu na cílové barvy nebo jas.

Triangulační princip je vysvětlen v kapitole 1.4.3. OptoNCDT 1320 vysílá z polovodičového laseru světelný paprsek, který vytváří na snímaném objektu světelný bod. Odražené světlo poté dopadá na vstupní čočku optického přijímače pod úhlem, který závisí na vzdálenosti snímaného předmětu od čela přijímače. Tento úhel se pak za čočkou vyhodnocuje jako vzdálenost světelného bodu na dopadové světlocitlivé ploše přijímače, tvořené CMOS¹⁷ senzorem, která ve výsledku odpovídá

¹⁴ Deterministický algoritmus: vždy ze stejných výchozích (vstupních) podmínek svým během vytvoří stejné výsledky (je tedy předvídatelný)

¹⁵ Latence: doba uplynulá mezi akcí (výzvou) a reakcí

¹⁶ VHDL: programovací jazyk pro programování hradlových polí

¹⁷ CMOS: Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, elektronická součástka sloužící k přeměně optického obrazu na elektrický signál

vzdálenosti snímaného objektu od snímače. U snímače platí, že s rostoucím měřicím rozsahem se snižuje hodnota linearit a rozlišení měření. Proto jsou uváděny jiné přesnosti pro různé měřicí rozsahy.

Snímací plocha CMOS senzoru přijímače má limitované rozměry, proto je měřicí rozsah vždy limitován v určitém rozsahu. Tento senzor nemusí sloužit pouze pro měření vzdálenosti, ale například i pro měření tloušťky průhledných předmětů a ploch. V tomto případě se na přijímači (CMOS senzor) vytvoří dvě světelné stopy (část odraženého světla od horní vrstvy a část světla odražená od 2. vrstvy). Dvě detekční místa umožňují detekovat a rozlišit jak snímaný předmět, tak například dopravní pás či podložku, na které je položen.

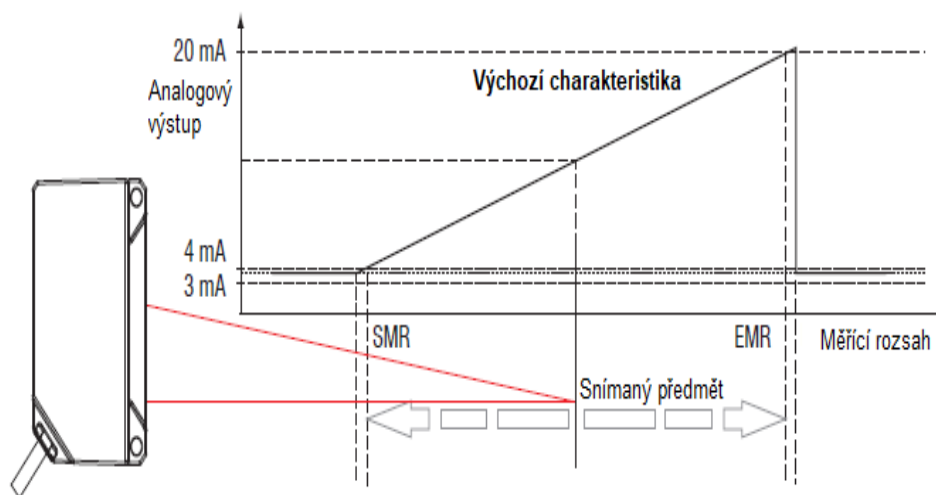
Jako zdroj světla senzoru se využívá polovodičové laserové diody o vlnové délce 670 nm (červené světlo) a spadá do třídy II laseru¹⁸. Její výkon je okolo 1 mW. Signálový procesor zpracovává elektrický signál ze snímače CMOS, ten z pozice světelného bodu na přijímači spočítá měřenou vzdálenost. Tato hodnota je poté pomocí řídicího procesoru převedena na výstupní analogový signál nebo digitální hodnotu. Pro vytváření 3D skener byl zvolen analogový výstup. Výstupní proud je v rozsahu od 4 mA do 20 mA. Vzorec pro výpočet vzdálenosti v milimetrech z výstupního proudu je následující:

$$d[mm] = \frac{I_{out}[mA] - 4[mA]}{20[mA] - 4[mA]} * MR[mm] \quad (7)$$

SMR – začátek měřicího rozsahu laserového snímače vzdálenosti

EMR – konec měřicího rozsahu laserového snímače vzdálenosti

MR – měřicí rozsah laserového snímače vzdálenosti



Obr. 20 Znáznorněná funkce snímače při měření vzdálenosti předmětu [22]

Pro vytváření 3D skener byl zvolen typ senzoru OptoNCDT 1320-100, který má měřicí rozsah 100 mm. Začátek měřicího rozsahu je 50 mm a konec 150 mm. Vzorkovací frekvence je továrně

¹⁸ II bezpečnostní třída laserů: lasery, které vyzařují viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm a která jsou bezpečná pro chvilková ozáření, ale mohou být nebezpečná při záměrném pohledu do svazku

nastavena na 1 kHz. Senzor má pět vstupů a tři výstupy. Rozsah napájecího napětí je od 11 V do 30 V. Vstup značen černým kabelem slouží pro povolení laseru, který je aktivní, pokud je tento vstup připojen ke GND senzoru. Bílý kabel je určen pro analogový výstup snímače. Výstupní napětí je v rozsahu od 1 V do 5 V při hodnotě zátěže 250 Ω . Další informace jsou shrnuty v Tabulka 2. [22]

Tabulka 2 Parametry laserového snímače vzdálenosti optoNCDT 1320

optoNCDT 1320-100		
Měřicí rozsah (mm)	100	
Začátek měřicího rozsahu (mm)	50	
Konec měřicího rozsahu (mm)	150	
Vzorkovací frekvence (kHz)	0,25/0,5/1/2	
Typ laseru	Polovodičový laser, 670 nm(červený)	
Třída laseru	II.	
	Min.	Max.
Analogový výstup (mA)	4	20
Napájecí napětí (V)	11	30

3.5. Napájecí zdroj IBM FRU P/N 49G2196, a proximity senzor

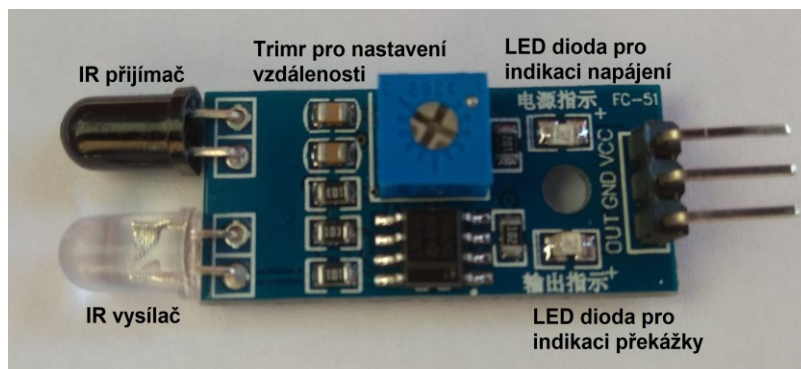
Pro napájení dvou krokových motorů typu ISM-7400E od firmy National Instrument a laserového snímače vzdálenosti byl zvolen zdroj od firmy IBM, který je schopen dodat fixní napětí v rozmezí deset až dvacet voltů. Maximální proud je v rozmezích 2 – 3.38 A. Vstupem je síťové napětí 230 V. Výstupní napětí zdroje bylo zvoleno na 20 V, to odpovídá požadavkům všech napájených komponent.

Tabulka 3 Parametry zdroje IBM FRU P/N 49G2196

IBM FRU P/N 49G2196		
	Min.	Max
Vstupní napětí (V), AC	110	240
Výstupní napětí (V), DC	10	20
Max. proud (A)	2	3,38

Funkcí infračerveného optického senzoru, Obr. 21, je detekce přiblížení tělesa k senzoru. Je umístěn v dolní části lineárního posunu pro detekci posuvníku a slouží pro zpomalení posunu pro doraz na jeho dolní okraj, viz (kalibrace, 5.4). Součástí senzoru jsou dvě infračervené diody, jedna

pro vysílání pulzu, druhá pro jeho příjem. Princip spočívá v tom, že vysílací dioda vyšle pulz, který se odrazí od překážky. Tento pulz je poté detekován přijímací diodou.



Obr. 21 Infračervený detektor překážek

Senzor má tři piny pro připojení a to GND, VCC a OUT. Výstup (OUT) je digitální a má obrácenou logiku. Při detekci překážky je na výstupu logická nula. Pomocí trimru lze nastavit detekční vzdálenost.

Tabulka 4 Parametry infračerveného detektoru překážek

IR senzor překážek		
	Min.	Max
Napájecí napětí (V)	3,3	5
Rozsah detekce (cm)	2	30
Max. proud (mA)	25	

3.6. DPS pro propojení NI myRIO s komponenty, ukázka kompletní konstrukce

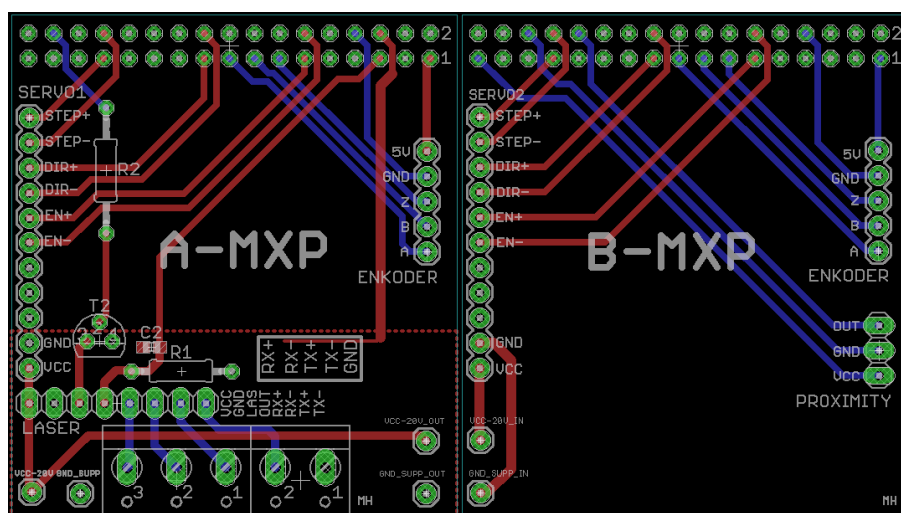
Pro propojení všech hardwarových komponent spolu s platformou myRIO 1900 byla navržena deska plošných spojů (DPS) pro každý MXP konektor (A, B). Hlavní důvody vytvoření DPS:

- úspora místa oproti zapojení pomocí nepájivého pole
- vzhled celkového provedení
- fixní zapojení, nemožnost vypadnutí drátu nebo součástky

Na konektor MXP A je připojen laserový snímač polohy OptoNCDT 1320, viz. kapitola 3.4. Zapínání laseru je řešeno pomocí bipolárního tranzistoru BC547, kde báze je připojena k platformě myRIO 1900, kolektor k laserovému pinu snímače a emitor k zemi zdroje napájení. Při vyslání logické jedničky (3.3 V) na bázi dojde k propojení pinu pro laser a zem, laser se tedy zapne. Součástí zapojení je šroubovací svorkovnice pro možnost budoucího připojení převodníku RS422 pro ovládání

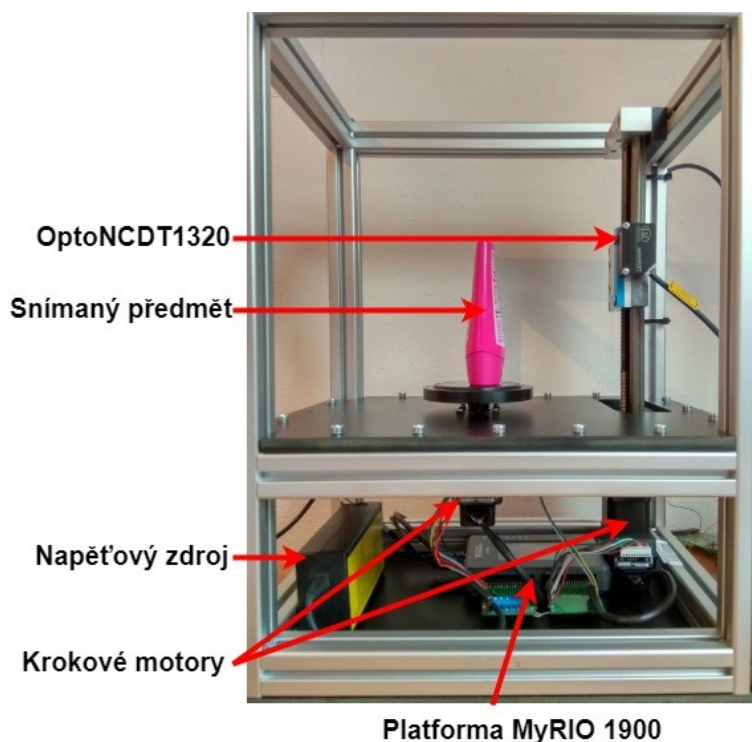
OptoNCDT1320 digitálně. Analogový výstup z laseru je k platformě myRIO-1900 připojen přes paralelně připojený rezistor ($R1 = 217 \Omega$) a kondenzátor ($C2 = 100 \text{ nF}$).

Na konektor MXP B je připojen infračervený detektor překážek. Je napájen 3,3 V přímo z platformy myRIO 1900. Schéma připojení pro konektor MXP A lze vidět v Příloha 2.



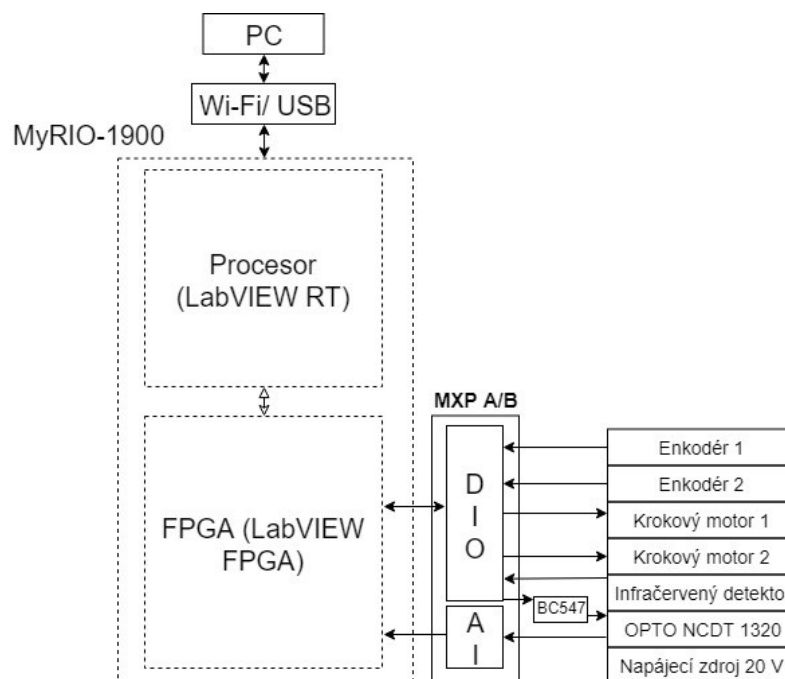
Obr. 22 DPS pro připojení komponent k platformě myRIO 1900

Kompletní konstrukci lze vidět na Obr. 23. Laserový snímač polohy OptoNCDT 1320 je přimontován k lineárnímu posunu díky plastovému hranolu, vytištěném na 3D tiskárně. Z důvodu zabránění pohybu během skenování byl snímáný předmět umístěn na protiskluzové podložce.



Obr. 23 Kompletní konstrukce výukového 3D skeneru

Na Obr. 24, lze vidět blokové schéma propojení hardwarových komponent s platformou myRIO-1900. Tabulka 5 zobrazuje propojení hardwarových komponent s jednotlivými svorkami platformy myRIO-1900.



Obr. 24 Blokové schéma propojení hardwarových komponent

Tabulka 5 Propojení jednotlivých komponent s platformou myRIO-1900

myRIO-1900, A-MXP	
Hardware	PIN
Krokový motor 1 (ISM 7400E)	-
Step +	27
STEP-	28
DIR +	19
DIR -	20
EN +	11
EN -	12
Enkodér krokového motoru 1	-
A +	17
B+	15
Index +	13
5VDC	1
GND	8
BC 547	-
Báze	32
OPTO NCDT 1320	-
GND	6
OUT	5

myRIO-1900, B-MXP	
Hardware	PIN
Krokový motor 2 (ISM 7400E)	-
Step +	27
STEP-	28
DIR +	19
DIR -	20
EN +	11
EN -	12
Enkodér krokového motoru 2	-
A +	17
B+	15
Index +	13
5VDC	1
GND	8
Infračervený optický senzor	-
3,3VDC	33
GND	30
OUT	26

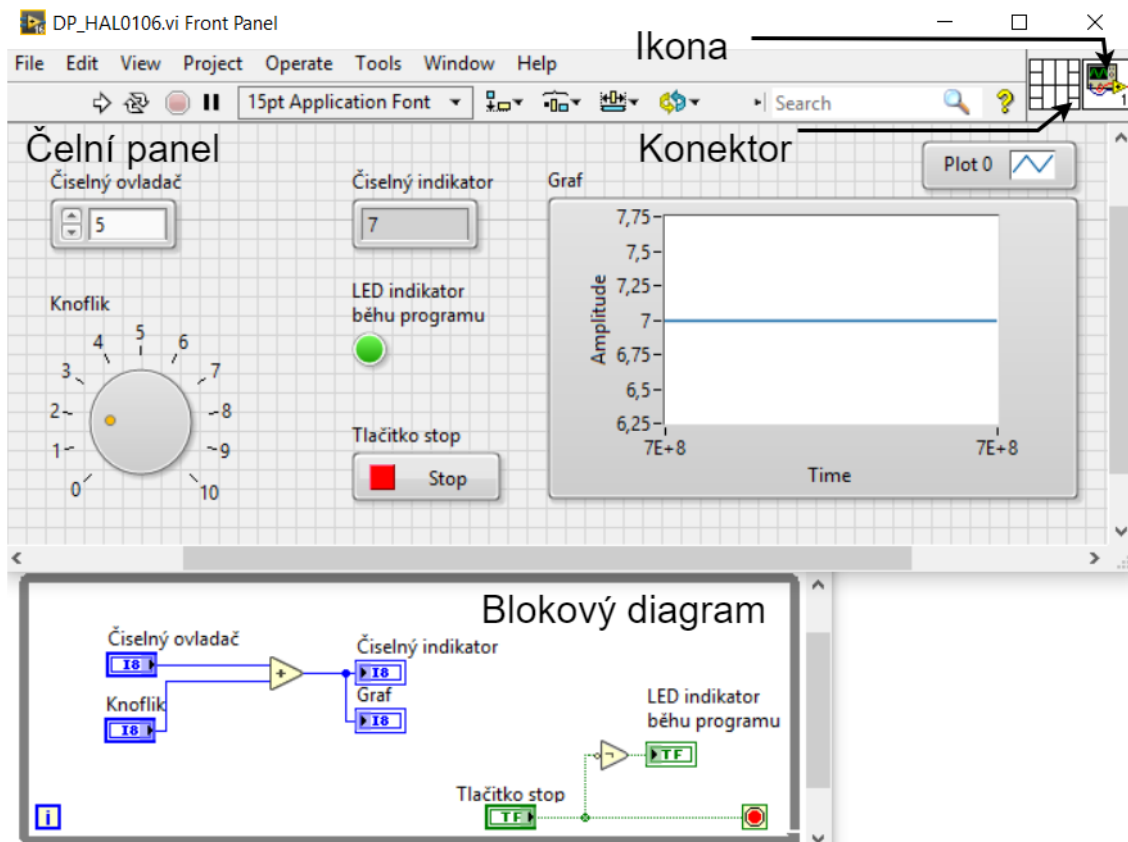
4. Seznámení se s vývojovým nástrojem LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) od firmy National Instruments je software pro vytváření aplikací pro automatizaci měření a testování. Jedná se o grafické vývojové prostředí, kde se pro tvorbu programu místo textu používá grafický kód.

LabVIEW je obecné vývojové prostředí, které obsahuje velké množství knihoven, a je převážně určeno pro vývoj aplikací v oblasti měření (sběr dat, analýza, komunikace, prezentace). Poskytuje plnohodnotný jazyk, tzv. grafický (G – graphical) jazyk. [26], [27]

Výsledný produkt je virtuální instrument (VI) a jeho součástí jsou:

- Interaktivní grafické rozhraní (GUI) – tzv. čelní panel, který je určen pro ovládání a indikaci vytvořeného programu. Pro indikaci slouží např. grafy, číselné indikátory, LED indikátory.
- Blokový diagram – je tvořen ikonami, které mají v koncové části ovládací a indikační prvky čelního panelu. Blokový diagram je zdrojem každé aplikace a řídí činnost virtuálního instrumentu.
- Struktura instrumentu je modulární. Lze jej použít samostatně (jako celý program) nebo jako podprogram (subVI). Součástí každého VI je jeho ikona, kterou je reprezentován v blokovém diagramu a konektory značící místa pro vstupní a výstupní veličiny.



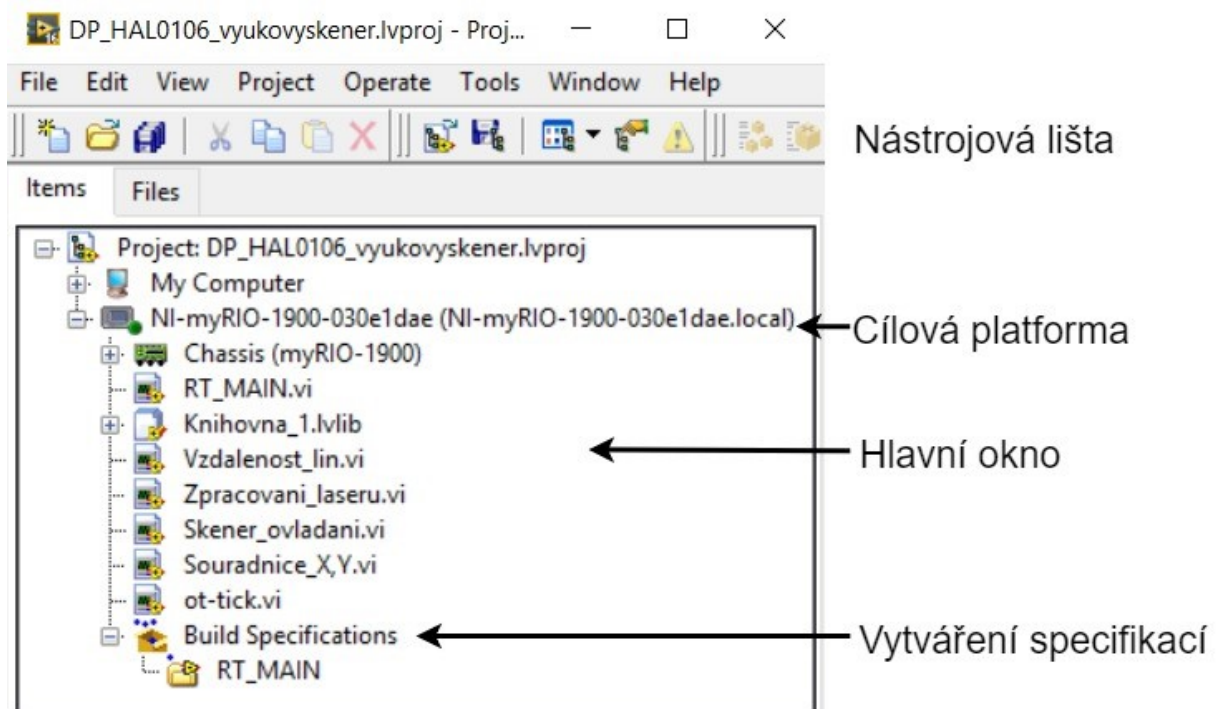
Obr. 25 Části virtuálního instrumentu

LabVIEW project explorer

Project Explorer slouží ke spravování projektu. Lze v něm editovat a prohlížet celkovou hierarchii VI. Součástí projektu jsou veškeré subVI, uživatelské knihovny, globální proměnné a také soubory, které LabVIEW nevytváří, ale může je využít.

Přípona projektu je *.lvproj. Obsahuje veškeré odkazy na soubory, které jsou součástí projektu a taktéž potřebné soubory k nahrání na cílový hardware. Jen pomocí Project Exploreru lze vytvořit *.exe aplikaci. Projekt se musí používat při práci s moduly využívajícími reálný čas (RT moduly) nebo při práci s FPGA. Práce s Project Explorer umožňuje: [28],[29]

- přístup k veškerým souborům definovaným v uživatelské struktuře
- nastavení a kompilaci např. samostatné aplikace, knihovny DLL a webové služby
- správu a práci s hardware zařízeními tzv. targety (myRIO 1900, NI CompactRIO, FPGA)
- zachování odkazů na VI, při případném přesunu nebo přejmenování souboru na disku



Obr. 26 Ukázka project exploreru s vyznačením prvků

Záložka items poskytuje stromové zobrazení položek. Záložka files zobrazuje cestu k souborům na disku.

5. Návrh a realizace celé SW aplikace s přihlédnutím k použitelnosti pro výuku

Zadáním diplomové práce bylo navrhnout 3D skener využívající 1D triangulaci pomocí laserového paprsku vysílaného snímačem polohy OptoNCDT 1320, viz kapitola 3.4. Snímač polohy dává pouze informaci o poloměru tělesa, proto musely být dodány dva krokové motory pro možnost 3D skenování. První krokový motor otáčí předmětem a dodává informaci o úhlu natočení tělesa. Druhý posouvá senzor vzdálenosti po vertikální ose a dává informaci o výšce tělesa. Díky koordinaci těchto tří hlavních komponent dojde k postupnému skenování objektu a jeho digitalizaci.

Úkolem vytvořené softwarové aplikace bylo ovládat funkční prvky skeneru a zároveň z nich získat a následně zpracovat potřebné informace. Aplikace byla vytvořena pomocí vývojového prostředí LabVIEW, které bylo popsáno v předešlé kapitole. Pro sběr a zpracování signálu byla zvolena platforma myRIO 1900, viz kapitola 3.3, která obsahuje programovatelný obvod FPGA, který je ideální pro ovládání krokových motorů.

Požadavky na aplikaci:

- přehlednost a snadná obsluha uživatelského rozhraní
- automatická kalibrace pro návrat lineárního posunu do počátečního bodu
- možnost manuálního nastavení počátku skenování
- indikace poloměru předmětu spolu s úhlem natočení otočné platformy a současnou výškou lineárního posunu při manuálním nastavení počátku skenování
- možnost připojení se k platformě myRIO 1900 přes USB kabel nebo pomocí WI-FI
- indikace průběhu skenování a vykreslování snímaného předmětu v reálném čase
- možnost načtení již naskenovaného předmětu
- možnost uložení do formátu *.xlsx¹⁹ pro zpracování dat pomocí jiných programů (MATLAB)
- možnost exportu naměřených dat do formátu *.STL pro 3D tisk nebo CAD programy
- možnost manuálního zapínání optického snímače vzdálenosti pro měření poloměru předmětu
- samostatná aplikace pouze pro ovládání krokových motorů (FPGA)
- přehledný a okomentovaný zdrojový kód pro možné budoucí modifikace
- možnost ukončení skenování manuálně
- detekce a následně zastavení pohybu pohyblivé části lineárního posunu při nárazu do okraje
- po ukončení programu posunutí pohyblivé části lineárního posunu, aby nedocházelo k deformaci přírodního kabelu patřícímu snímači vzdálenosti

V rámci této kapitoly jsou popsány veškeré funkční bloky vytvořené aplikace pro ovládání 3D skeneru.

¹⁹ Xlsx: tabulkový formát určený pro program Microsoft Excel

5.1. Popis kompletní SW aplikace

Aplikace pro ovládání 3D skeneru je rozdělena do tří hlavních částí:

- FPGA
- Real-Time procesor
- PC-host

Hlavním úkolem programovatelného obvodu FPGA je ovládat krokové motory. Ty jsou řízeny pomocí digitálních pulzů, které dokáže FPGA velmi přesně generovat. V rámci tohoto bloku je také sběr dat z rotačních enkodérů, které generují tisíc pulzů na otáčku, a jde z nich zjistit požadované informace o poloze krokových motorů. Součástí tohoto bloku je sběr dat z kompaktního laserového snímače polohy OptoNCDT 1320, infračerveného detektoru překážek a taky ovládání laseru. Posledním algoritmem, který se nachází na FPGA části, je detekce krajní polohy posuvné části lineárního posunu.

Operační systém reálného času je speciálně navržen pro velmi přesné časování operací a vysoký stupeň spolehlivosti. Proto je jeho hlavní funkcí sběr dat z FPGA a jejich zpracování. Jeho součástí je také odesílání uživatelských dat (např. rychlost otáčení krokových motorů) zpět do programovatelného bloku. Real-Time blok obsahuje:

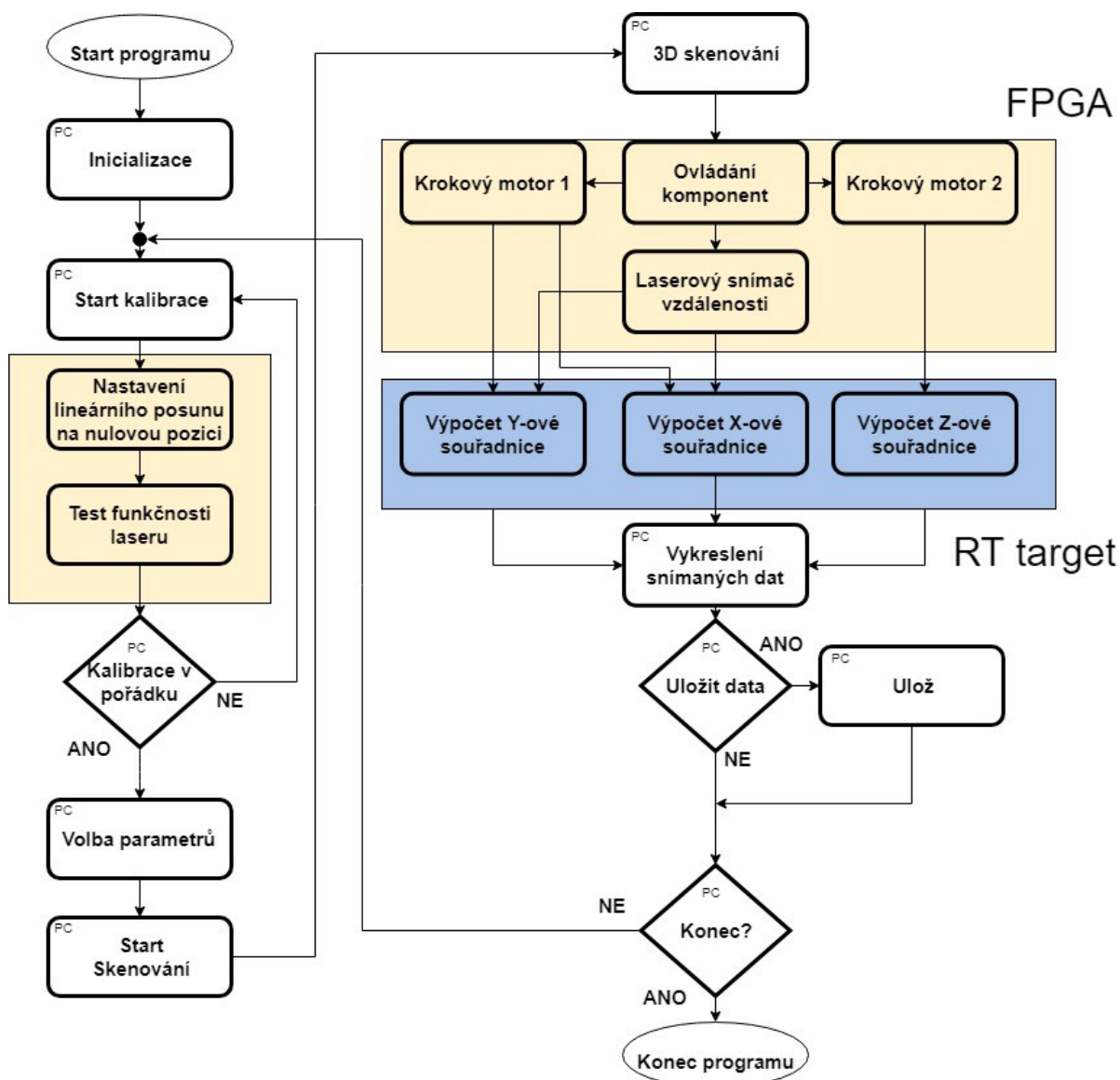
- převod analogových hodnot kompaktního laserového snímače polohy a jejich přepočítání na vzdálenost v milimetrech
- přepočítání počtu pulzů enkodéru krokového motoru ovládajícího karusel na úhel natočení
- přepočítání počtu pulzů enkodérů krokového motoru ovládajícího lineární posuvník na výšku od počáteční polohy
- detekce ukončení skenování
- výpočet souřadnic X a Y podle vzorce (5) a (6)
- přepočítání uživatelsky zadaných hodnot rychlosti krokových motorů na počet tiků 40MHz oscilátoru FPGA

Celá aplikace skeneru je z pohledu uživatele řízena pomocí osobního počítače s nainstalovaným potřebným softwarem (NI LabVIEW). Tato část je pojmenovaná jako PC-Host a její hlavní funkcí je řízení FPGA a Real-Time části pro skenování požadovaného objektu. Využívá synchronizačních nástrojů, tzv. front. Ty představují paměť typu FIFO (First In – First Out). Nová data jsou vkládána na konec fronty, čtení probíhá z jejich začátku postupně, element po elementu. Výsledný program je díky tomu mnohem přehlednější, protože nebylo zapotřebí více samostatných smyček. Hlavní program se skládá ze dvou paralelních smyček typu producent/konzument.

První smyčka (producent) obsahuje uživatelské rozhraní. Stará se o obsluhu všech kontrolních prvků souvisejících s během programu, např. tlačítka skenuj a kalibrace. Druhá smyčka (konzument) obsahuje veškeré podprogramy, které jsou umístěny v CASE²⁰ struktuře. Program je nastaven tak, že během kalibračního procesu a vlastního skenování nejde stisknout žádné kontrolní tlačítko kromě

²⁰ Case struktura: obsahuje dva nebo více subdiagramů, viditelný je pouze jeden. Selektor (vstupní hodnota) rozhoduje o tom, který ze subdiagramů struktury se bude vykonávat.

vypínacího. Měřená data se předávají mezi podprogramy pomocí tři posuvných registrů, každý pro jednu osu.



Obr. 27 Vývojový diagram kompletní aplikace

Zjednodušený vývojový diagram celé aplikace lze vidět na Obr. 27. Oranžová barva označuje FPGA část a modrá značí Real–Time část programu. Bílé části značí kód, který běží na PC. Na začátku aplikace proběhne inicializace výchozích hodnot, včetně vynulování grafů a vypnutí laseru. Poté následuje kalibrace, ve které se posuvná část lineárního posunu posune na dolní okraj a pak do počáteční pozice pro skenování (počátek snímaného předmětu). Po úspěšné kalibraci může uživatel přenastavit parametry skenování, např. rychlost otáčení karuselu, rychlost lineárního posunu (v milimetrech) a počet otáček na jeden řez. Následně může dojít k zahájení samotného skenování. Postupně jsou snímány jednotlivé řezy objektu, které jsou skládány dohromady, tak vzniká 3D sken.

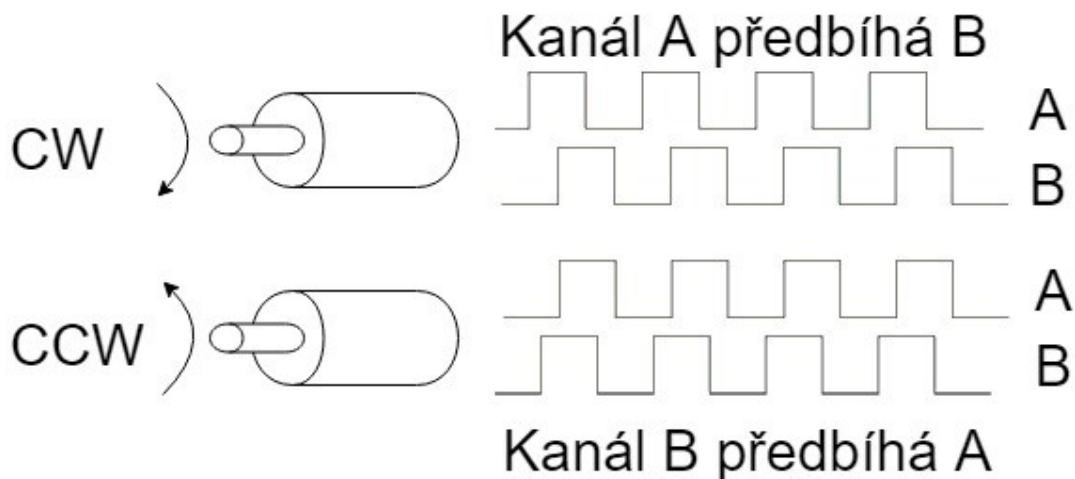
Při dokončení skenování dojde k vykreslení dat do povrchového (surface) a síťového (mesh) grafu. Následně uživatel může nasnímaná data uložit do excelového souboru s koncovkou *.xlsx nebo do formátu pro 3D tiskárny *.STL.

V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány jednotlivé části.

5.2. FPGA VI

Jak již bylo zmíněno, hlavním úkolem FPGA části aplikace je řízení krokových motorů. Ty jsou ovládaný pomocí digitálních pulzů. Řídicí program je rozdělen do čtyř paralelních smyček. První dvě smyčky mají na starost sběr dat z rotačních enkodérů krokových motorů a zbývající dvě slouží pro generování pulzů. Všechny řídicí smyčky mají nastaveny systémové hodiny o hodnotě 40 MHz. Vytvořené VI je nahrané na FPGA platformy myRIO 1900.

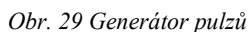
Enkodér má dva kanály A, B, viz. Obr. 28, které jsou od sebe posunuty o 90 stupňů. Při otáčení ve směru hodinových ručiček se náběžná hrana kanálu A porovnává s aktuální hodnotu kanálu B. Pokud je hodnota A větší než hodnota B a zároveň předchozí hodnota kanálu A je rovna logické nule, dojde k inkrementaci hodnoty počtu pulzů. Předchozí hodnoty jsou uchovávány pomocí tzv. FeedBack node, který uchovává data z předchozí iterace smyčky. Při směru otáčení proti hodinové ručičce je situace obrácená (hledá se náběžná hrana B kanálu). Na jednu otáčku dává enkodér tisíc pulzů. To bylo využito pro dva indikátory pulzu otáček. První se nuluje při každém překročení maximální hodnoty a používá se pro počítání úhlu natočení platformy. Druhý pokračuje v inkrementaci do ukončení programu nebo uživatelskému restartu a využívá se pro počítání výšky posuvné části lineárního posunu. Počet impulzů lze uživatelsky resetovat. Další výstupní indikátor je počet otáček, který se vždy inkrementuje, nehlédě na směr otáčení. Součástí enkodéru je taky indexer. Hledá se jeho náběžná hrana, která se objeví jednou za otáčku. Při jeho detekci dojde k inkrementaci počtu indexů.



Obr. 28 Princip rotačního enkodéru. CW-ve směru hodinových ručiček, CCW-proti směru hodinových ručiček

Generování pulzů má jako vstup trvání log. 1 a log. 0 v počtu tiků 40 MHz oscilátoru FPGA. Trvání pulzů je sečteno pro získání periody jednoho cyklu. Kód podprogramu pro generování pulzů lze vidět na Obr. 29. Pokud je čítač periody menší než trvání log. 1, je na výstupu generátoru hodnota TRUE. V opačném případě je na výstupu log. 0. Pulzy jsou vysílány pouze pokud je povolena

V programu je maximální povolena hodnota počtu otáček za sekundu nastavena na hodnotu pět, což odpovídá periodě 320 tiků 40MHz oscilátoru FPGA. Méně než tuto hodnotu nejde do aplikace zadat. Rychlost krokového motoru ovládá frekvence generovaných pulzů.

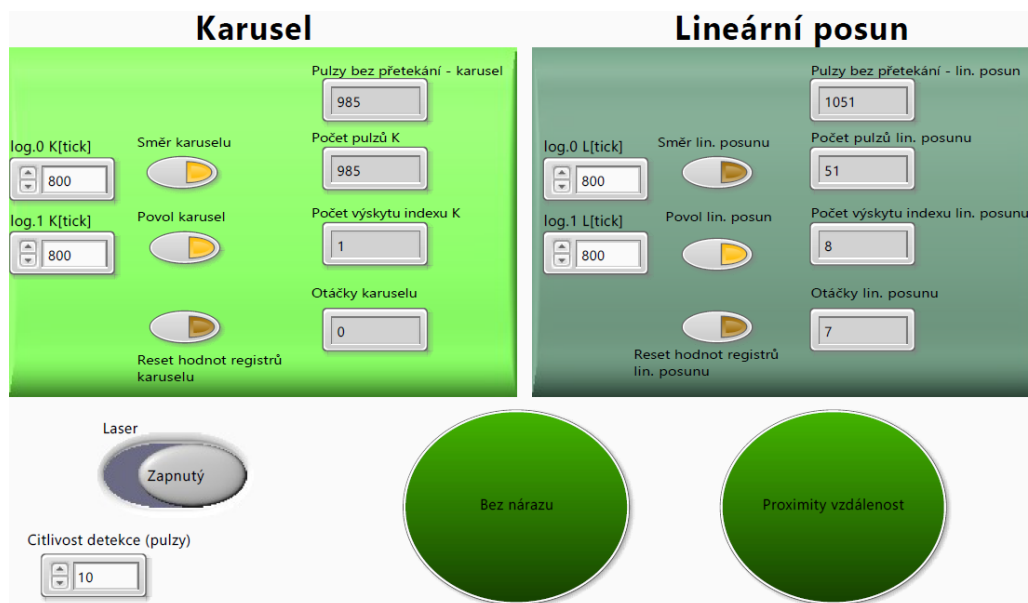


Součástí programovatelného obvodu FPGA jsou ještě dvě paralelní smyčky. První z nich má na starost spínání tranzistoru, který ovládá zapínání laseru a taky se využívá pro získávání analogové hodnoty vzdálenosti z laserového snímače polohy. Tato data jsou tzv. RAW (nezpracovaná) a dále se upravují v Real-Time procesoru. Součástí této smyčky je také sběr dat z digitálního výstupu infračerveného snímače překážky. Tento snímač má obrácenou logiku, pokud nezaznamenává překážku, je na výstupu log.1 (3,3 V).



44

nastaveného intervalu dojde k odečtení aktuální hodnoty počtu pulzů od hodnoty z prvního subdiagramu. V poslední části dojde k porovnání rozdílu hodnot. Pokud je menší než nastavená hodnota citlivosti, došlo k detekci koncové polohy pohyblivé části lineárního posuvníku a zobrazí se hodnota TRUE v indikátoru „překážka“. Výchozí hodnota citlivosti detekce je nastavena na 15 pulzů.



Obr. 31 Zobrazení uživatelského rozhraní FPGA programu

5.3. Real–Time VI

Hlavním úkolem Real–Time procesoru je sběr dat z FPGA a jejich zpracování a taky odesílání uživatelských dat (např. rychlost otáčení krokových motorů, ovládání laseru, restart proměnných) do FPGA VI. Program se skládá z jedné časové smyčky (z důvodu přesného časování), která obsahuje část pro zpracování dat a taky pro jejich odesílání. Zdrojem časové smyčky jsou 1kHz hodiny s periodou opakování 1 ms. Vytvořené VI je nahráno na Real–Time procesoru platformy myRIO 1900.

Pomocí funkce Open FPGA VI reference se nahraje vytvořený bitfile obsahující FPGA VI. V důsledku toho začne komunikace mezi Real–Time částí a FPGA VI. Funkce Read/Write control dává přístup ke všem proměnným vytvořených v FPGA VI. Po ukončení běhu hlavní smyčky se díky funkci Close FPGA VI reference vypne komunikace mezi Real–Time částí a FPGA VI.

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole 5.2., analogové hodnoty vzdálenosti z laserového snímače polohy jsou tzv. RAW (nezpracované), takže se dále musí zpracovat. To řeší subVI pro zpracování hodnot laseru. Analogové vstupy mají 12 bitový ADC převodník a maximální rozsah vstupního napětí 0 V–5 V. RAW hodnoty se převedou na napětí podle vzorců:

$$Váha_{LSB} = 5 \text{ V} \div 2^{12} \quad (8)$$

$$V = RAW_{data} \cdot Váha_{LSB} \quad (9)$$

- $Váha_{LSB}^{21}$ je hodnota voltů vyjadřující přírůstek mezi hodnotami dat [18]

²¹ LSB: nejméně významný bit

Z vypočteného napětí lze dopočítat hodnotu vzdálenosti laserového paprsku (v milimetrech) a z té poté poloměr předmětu. Nejdřív je nutné vypočíst proud, viz. (10), ze známého napětí a odporu, který je roven přibližně 217 Ω . Pro získání vzdálenosti odrazu laserů v milimetrech se vypočtený proud dosazuje do rovnice (7).

$$I [A] = \frac{V}{R} = \frac{V}{217} \quad (10)$$

Vzdálenost laserového snímače polohy od středu karuselu je přibližně 79 milimetrů. Pro získání poloměru snímaného objektu se počítá rovnice (11). Pokud výsledná hodnota spadá do zvoleného intervalu 0 mm–80 mm, zapíše se do indikátoru poloměru daná hodnota. Pokud nespadá, laser nic nedetekuje nebo je poloměr objektu příliš velký pro snímání a do indikátoru se zapisuje předešlá hodnota, která spadala do intervalu. Součástí subVI pro zpracování hodnot laseru je taky detekce otočného karuselu, což se využívá při posunutí lineárního posunu na počátek skenování.

$$r [mm] = 79 [mm] - d [mm] \quad (11)$$

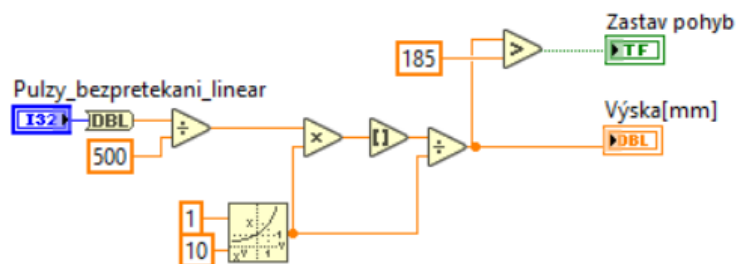
Implementací rovnice pro vypočtení úhlu (α) natočení karuselu, viz. (12), se získá přesná informace o jeho pozici. Tento úhel je ve stupních a je zaokrouhlen na jednotky. Úhel (α) se používá pro výpočet souřadnic X, Y, viz. (5), (6), ale nejprve se musí převést na radiány (13).

$$\alpha [^\circ] = \frac{A \cdot 360}{M} \quad (12)$$

$$\alpha [rad] = \frac{\alpha [^\circ]}{180} \cdot \pi \quad (13)$$

- A–aktuální hodnota počtu pulzů enkodéru
- M–počet pulzů na jednu otáčku enkodéru (1000)

Výpočet aktuální výšky lineárního posunu, Obr. 32, využívá toho, že jeden milimetr uražené vzdálenosti lineárního posunu je roven 500 pulzů z enkodérů. Dělením aktuálního počtu pulzů právě touto konstantou se získá výška lineárního posunu v milimetrech. Pokud výška přesáhne hodnotu 185 mm, zapíše se do indikátoru „zastav pohyb“ hodnota TRUE. Tento indikátor se využívá pro zastavení pohybu lineárního posunu při překročení zmíněné výšky.



Obr. 32 Výpočet výšky posuvné části lineárního posuvníku

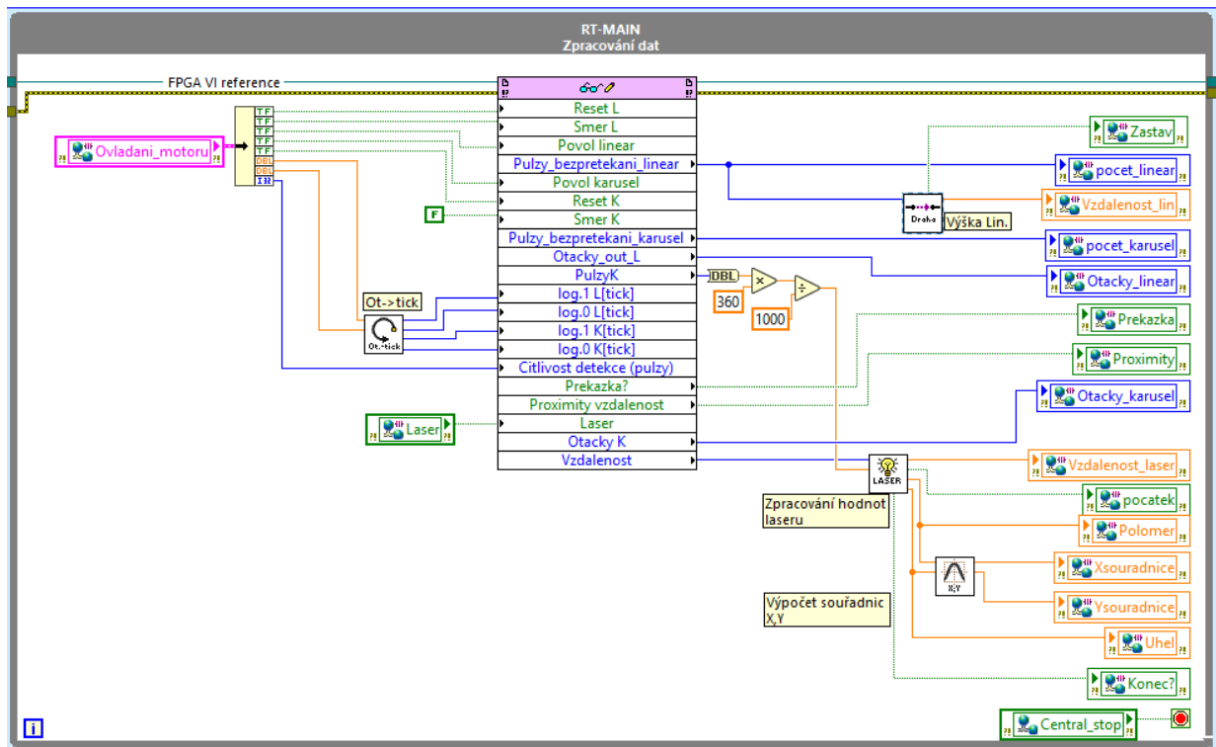
Poslední částí Real–Time VI je přepočítání rychlosti krokových motorů na hodnotu počtu tiků 40MHz oscilátoru FPGA. Jako první se hodnota rychlosti krokových motorů (v otáčkách za sekundu) vynásobí nastaveným počtem kroků krokových motorů na otáčku (25000). Podle střidy pulzů (50 %) se vypočte délka log. 1 a log. 0 v počtu tiků 40MHz oscilátoru podle následujících vzorců:

$$\log.1 [\text{tick}] = \frac{1}{O \cdot K} \cdot H \cdot 0,5 \quad (14)$$

$$\log.0 [\text{tick}] = \left(\frac{1}{O \cdot K} - \frac{1}{Ot \cdot K} \cdot 0,5 \right) \cdot H \quad (15)$$

- O – rychlost otáček zadaná uživatelem, v otáčkách za sekundu
- K – počet kroků krokových motorů na jednu otočku, nastaveno na 25000
- H – 40 MHz oscilátor FPGA

Všechny vypočtené proměnné se nahrávají do tzv. shared variables (sdílené proměnné), jejichž pomocí lze (jen v rámci projektu) předávat data mezi smyčkami, nebo různými VI napříč sítí. Existují dva typy sdílených proměnných, které se liší svou oblastí platnosti. Ve tvořeném softwaru byly použity sdílené proměnné – sítově sdílené (network published), kvůli schopnosti přenášet data mezi více programy. Tento typ proměnné využívá paměť typu FIFO. Zobrazení hlavní smyčky Real-Time VI je na Obr. 33. Ovládání motoru je ve sdílené proměnné typu klastr²², ze které jsou extrahovány informace ohledně řízení krokových motorů.



Obr. 33 Real-Time VI

5.4. PC–HOST VI

Hlavním úkolem aplikace PC – HOST VI je řízení FPGA a Real – Time části pro skenování požadovaného 3D objektu. Tato část obsahuje hlavní program, kterým se řídí průběh 3D skenování. Jak již bylo řečeno, program se skládá ze dvou paralelních smyček typu producent/konzument.

²² Klastr- (Cluster) seskupuje datové prvky různých datových typů.

Ve smyčce konzument se nachází všechny hlavní podprogramy, které jsou zapouzdřené v CASE struktuře.

Inicializace

Jako první po startu programu dojde k založení fronty a spuštění Real – Time VI umístěného na platformě MyRIO 1900, díky funkci Open application reference. Pro název platformy se využívá její doménové jméno (systém DNS²³) z důvodu jednoduchého připojení k myRIO 1900 pomocí USB nebo Wi-Fi bez nutnosti vždy měnit IP adresu.

Po načtení Real – Time VI dojde k inicializaci programu, kde dojde k nastavení všech výchozích parametrů:

- vymazání hodnot skenování z minulého spuštění programu
- výchozí nastavení parametru pro řízení krokových motorů
- restartování hodnot enkodérů krokových motorů
- vynulování všech grafů
- vypnutí laseru

Po inicializaci se spustí kalibrační proces.

Kalibrace

Kalibrační proces je celý umístěn ve „Flat sequency“, z důvodu postupného vykonávání kódu. Jako první během kalibračního procesu dojde k zablokování panelu, aby se do fronty příkazu nic nezapisovalo. Poté dojde k vypnutí laseru, které zde musí být, i když již bylo v inicializaci, z důvodu možného spuštění samotné kalibrace v průběhu programu.

Následně dojde k restartování hodnot registrů enkodérů krokových motorů a zakázání funkce řídicího obvodu krokového motoru ovládajícího karusel. Krokový motor ovládající lineární posuvník se povolí. Nastaví se směr otáčení pro pohyb dolů. Rychlost krokového motoru byla zvolena na čtyři otáčky za sekundu, pro rychlý návrat do výchozí pozice, a poté se nastaví hodnota citlivosti detekce koncové polohy lineárního posunu na 20 pulzů.

Další část obsahuje smyčku WHILE²⁴, ve které jsou infračervený detektor překážek a indikátor koncové polohy lineárního posunu připojeny na podmínkový terminál. Pokud se posuvná část lineárního posuvníku dostane do oblasti infračerveného detektoru překážek, dojde k ukončení smyčky a posunu do další části sekvence. Pokud infračervený detektor překážek nedetekuje lineární posun, tak smyčku ukončí až náraz posunu do okraje. V další části dojde ke změně rychlosti krokového motoru na půl otáčky za sekundu a nastavení citlivosti detekce koncové polohy lineárního posunu na 4 pulzy.

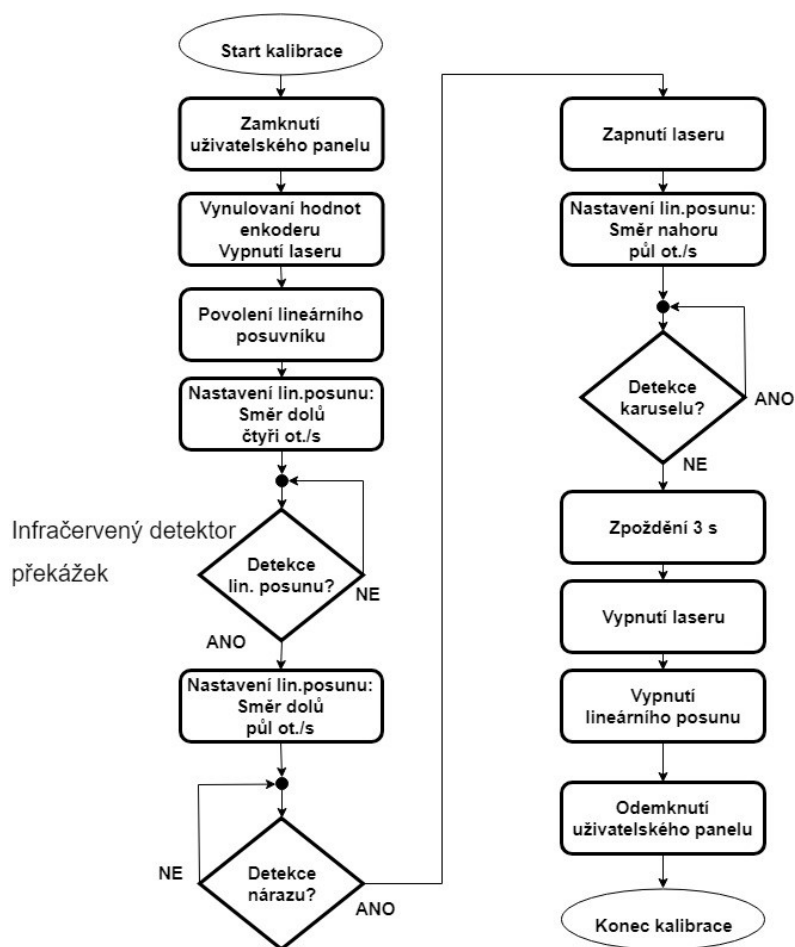
Následuje další WHILE smyčka, která obsahuje indikátor detekce koncové polohy lineárního posunu, viz Obr. 30. Pokud dojde k detekci spodní koncové polohy posuvné části lineárního posunu, tak dojde k ukončení smyčky a posunu do další části sekvence. V té dojde k zastavení krokového motoru

²³ DNS: (Domain Name System) je hierarchický systém doménových jmen. Hlavním úkolem jsou vzájemné převody doménových jmen a IP adres uzlů sítě.

²⁴ Smyčka WHILE: vykonává subdiagram (kód uvnitř smyčky), dokud není na podmínkový terminál smyčky přivedena specifická boolean (logická) hodnota.

řídícího lineární posun a k zapnutí laseru. Následuje krátká pauza (100 ms) z důvodu ustálení hodnot ze snímače.

V další části dojde opět k povolení krokového motoru řídícího lineární posun. Nastaví se směr otáčení pro pohyb nahoru. Rychlost krokového motoru byla opět nastavena na půl otáčky za sekundu. Následuje WHILE smyčka, která má na svůj podmínkový terminál přiveden indikátor detekce otočného karuselu. Pokud hodnoty laseru nejsou v daném rozmezí nastaveném pro detekci karuselu, dojde k ukončení smyčky. Z důvodu protiskluzové podložky umístěné na otočném karuselu se lineární posuvník ještě přibližně tři vteřiny pohybuje pro nastavení laseru přesně na začátek snímání. Začátek snímání je přibližně dva milimetry nad protiskluzovou podložkou z důvodu zabránění případných odrazů laseru. Poté dojde k vypnutí laseru a zakáže se funkce řídícího obvodu krokového motoru ovládajícího lineární posuvník. Jako poslední dojde k indikaci ukončené kalibrace (vyskočením okna) a odemknutí uživatelského panelu.

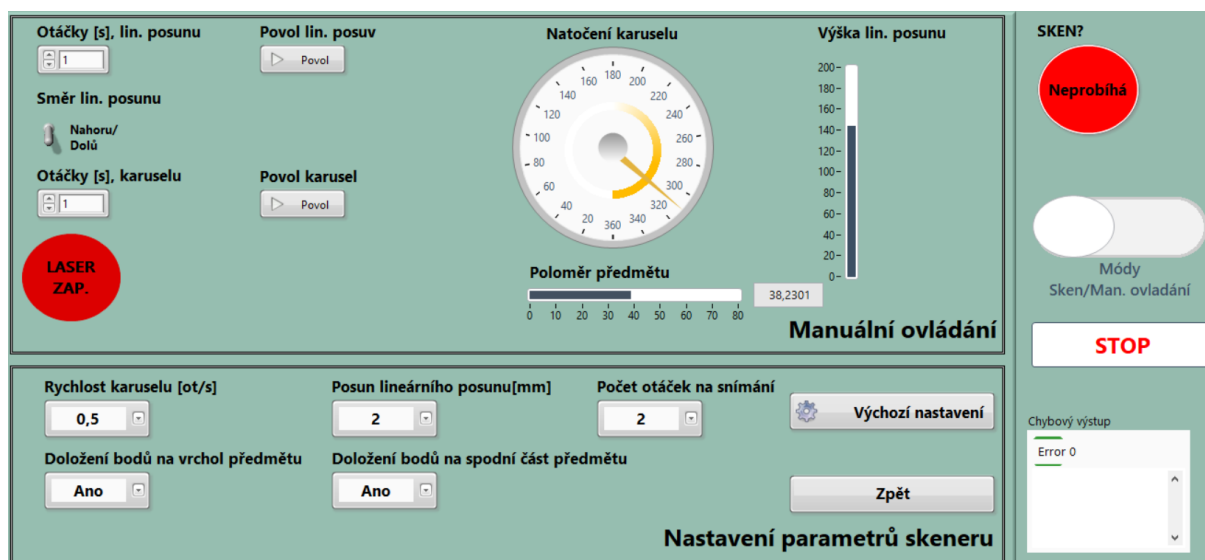


Obr. 34 Vývojový diagram kalibračního procesu

Manuální ovládání

Zvolením manuálního módu se zobrazí uživatelský panel, Obr. 35. Tento mód slouží pro ovládání krokových motorů, např. pro nastavení vlastního počátku skenování. Součástí panelu jsou parametry skeneru, které může uživatel libovolně měnit.

Měřicí proces je celý umístěn ve struktuře ‚Flat Sequence‘. Na konci sekvence dojde k zápisu tohoto podprogramu (manuální ovládání) na konec fronty, takže sekvence začne opět od začátku. Tento proces se opakuje do té doby, než ho uživatel ukončí. Součástí procesu měření je kontrola výšky lineárního posunu. Pokud překročí hodnotu 185 milimetrů, dojde k návratu posunu na hodnotu 180 a k upozornění uživatele na překročení maximální povolené výšky. Proto musí být kalibrace provedena po každém skenování. Když si uživatel zvolí svůj začátek snímání, posune se počáteční bod. Při manuálním řízení by tím pádem nedošlo k zastavení pohybu včas.

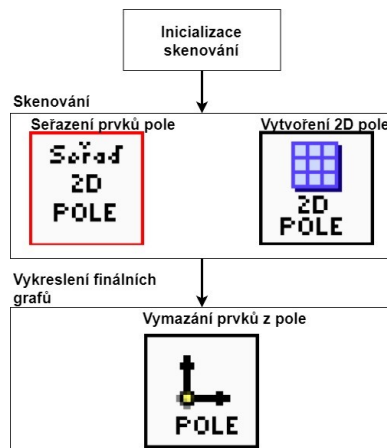


Obr. 35 Uživatelský panel programu pro manuální ovládání a nastavení parametrů skenování

Skenování

Celý skenovací proces je rozdělen do tří samostatných podprogramů (umístěných ve smyčce Konzument), viz Obr. 36. První podprogram slouží pro inicializaci výchozích hodnot skenu, druhý pro samotné skenování a třetí pro zastavení skenování, vykreslení jednotlivých grafů a úpravu os. Podprogramy jsou umístěny ve ‚Flat Sequence‘ z důvodu sekvenčního vykonávání, což je kriticky důležité pro 3D skenování.

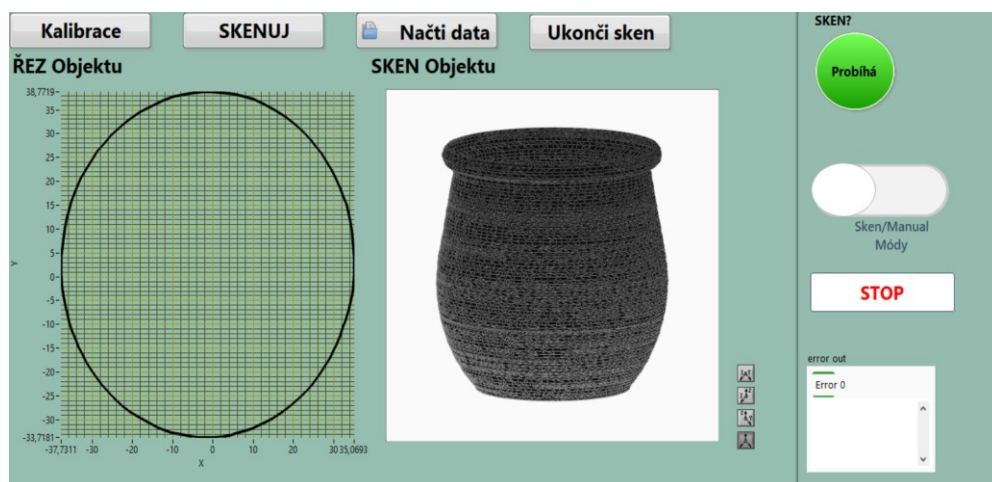
Při spuštění skenování proběhne jako první inicializace výchozích hodnot skenu, viz Obr. 36. V ní dojde k restartování hodnot registrů enkodérů krokových motorů a k zapnutí laseru. Poté se povolí funkce řízení krokového motoru ovládajícího otočnou platformu a nastaví se zvolená rychlost otáčení. Následně dojde k výpočtu horního a dolního limitu posunu lineárního posunu dle zvolené výšky posouvání. Dalším krokem je zablokování kontrolních tlačítek, kromě těch pro ukončení skenování a celého programu. V dalším subdiagramu dojde k výpočtu horního a dolního limitu otáček karuselu dle zvolené rychlosti otáčení. V posledním kroku se vynulují hodnoty z minulého měření a dojde k přepnutí do podprogramu pro skenování, viz Obr. 38 (vynulování polí).



Obr. 36 Podprogramy skenovacího procesu spolu s jednotlivými SubVI

První část podprogramu pro skenování obsahuje časovou smyčku WHILE, viz Obr. 38 (požadované pulzy karuselu). Zdrojem smyčky jsou 1kHz hodiny s periodou opakování 1 ms. V ní se tvoří čtyři jednorozměrná pole hodnot. Konkrétně se jedná o souřadnice X a Y, o úhel (α) a výšku lineárního posunu (Z). Smyčka má na svém rozhodovacím terminálu připojenou funkci „In range“, která má na svém výstupu hodnotu TRUE, pokud hodnota přivedená do funkce spadá do nastaveného intervalu. Do smyčky se na začátku nahraje aktuální hodnota počtu pulzů, která se pak odečítá od hodnoty pulzů měnících se v průběhu cyklu. Pokud rozdíl těchto hodnot spadá do nastaveného limitu, dojde k ukončení smyčky. Tento interval má rozsah přibližně 50 pulzů. Pokud by interval nebyl přítomen, mohla by nastat možnost, že by se nedetekovala přesná požadovaná hodnota a smyčka by nebyla ukončena. Z toho důvodu je zvolen malý interval, aby se smyčka vždy ukončila.

Další subdiagram podprogramu pro skenování obsahuje subVI pro seřazení polí, viz Obr. 38 (seřazení polí). Na začátku dojde ke zkontrolování velikosti polí. Důvodem je, aby pole měla vždy stejný počet prvků, což se nemusí pokaždé stát z důvodu smyčky WHILE, která se může ukončit s méně iteracemi, než smyčka minulá (kvůli ukončovacím intervalu). Hodnoty X a Y jsou aproximovány pomocí B – spline křivky pro jejich vyhlazení. Všechna jednorozměrná pole jsou poté vložena do jednoho 2D pole, kde jsou vzestupně seřazena podle úhlu natočení. Poté je 2D pole opět rozděleno na jednotlivá jednorozměrná pole.

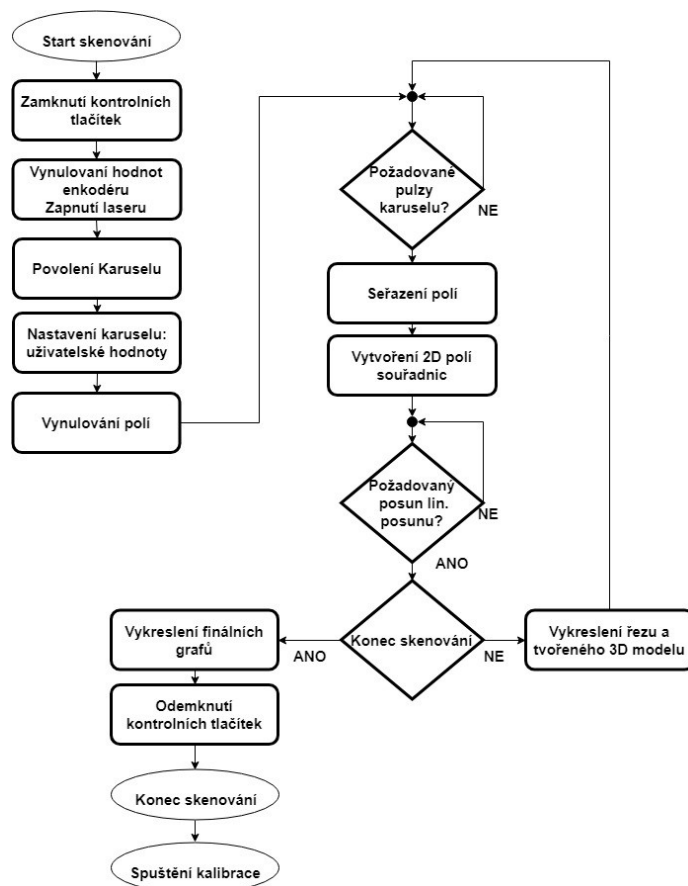


Obr. 37 Ukázka průběhu skenování

Následující subdiagram obsahuje subVI pro vytvoření jednotlivých 2D polí, viz Obr. 38 (vytvoření 2D pole souřadnic). Všechna jednorozměrná pole se umísťují vždy na nový řádek 2D pole. Tak vznikají pole jednotlivých souřadnic, které se pak vykreslují. Na začátku programu si uživatel volí, jestli chce spodek předmětu dutý nebo spojitý. To se rozhoduje při tvoření polí, kdy jsou na první řádek nahrány nuly nebo snímané hodnoty.

Další část sekvence podprogramu pro skenování obsahuje časovou smyčku WHILE, viz Obr. 38 (požadovaný posun lineárního posunu). Zdrojem této smyčky jsou 1kHz hodiny s periodou opakování 1 ms. V ní dojde k posunu lineárního posuvníku o zvolený počet milimetrů. Princip je stejný jako u časové smyčky hlídající otáčky karuselu. Součástí smyčky je detekce koncové polohy lineárního posunu. V této smyčce se žádné pole netvoří. V následující části podprogramu dojde k vypnutí lineárního posunu.

Poslední subdiagram podprogramu pro skenování obsahuje CASE strukturu, na jejíž rozhodovací terminál je přiveden indikátor pro konec skenování, viz Obr. 38 (konec skenování). Pokud konec snímání není indikován, dojde k vykreslení tvořeného skenu a k zápisu tohoto podprogramu (skenování) na konec fronty, takže sekvence začne opět od začátku. V průběhu se vykresluje graf řezu skenovaného objektu a jeho tvořený 3D model, viz Obr. 37. Konec skenování má v sobě tyto indikátory: detektor nárazu lineárního posunu do okraje, uživatelský konec skenování, konec programu, detekce konce snímaného předmětu. Pokud některý konec nastane, dojde k přepnutí do podprogramu pro finální vykreslení.



Obr. 38 Vývojový diagram podprogramu pro skenování

První část podprogramu pro vykreslování, viz Obr. 36, obsahuje vypnutí laseru a krokového motoru ovládajícího karusel. Následuje subVI pro vymazání posledních tří řádků 2D polí. Důvodem je, že ke konci skenování mohou nastat nepřesnosti způsobené vrcholem předmětu, proto se poslední tři řezy odstraňují. Ještě před odstraněním hodnot z pole Z souřadnice je extrahována její poslední hodnota. K této hodnotě se přičte konstanta 1,5 (posunutí začátku skenování) pro získání reálné výšky předmětu. Součástí tohoto subVI je možnost doplnění bodu na vrchol předmětu pro jeho spojitost. Hodnoty z tohoto subVI jsou poté vykresleny v grafech. Porovnává se velikost největších a nejmenších hodnot polí X a Y a podle toho se nastaví rozpětí os. Na konci podprogramu dojde k povolení kontrolních tlačítek a ke spuštění kalibrace z důvodu nastavení počátku skenování od nulové výšky (podrobněji vysvětleno v sekci manuálního ovládání).

Ukládání dat

Data je možno exportovat do dvou formátů, a to do *.xlsx a *.STL. Program pro ukládání je umístěn do CASE struktury (konzument smyčky). Podle zvoleného formátu dat se vykoná daná část podprogramu.

Ukládání do *.xlsx je řešeno pomocí knihovny CLAUDIE_xlsx (Compact Library And Universal Data Import Export xlsx). Knihovna byla vybrána z důvodu rychlého zápisu velkého množství dat do souboru, např. 2D pole o 300 sloupcích a řádcích. Data jsou ukládána jako text, proto byl vytvořený soubor upraven pomocí programovacího rozhraní Microsoft.Office.Interop.Excel, kde byla data převedena do číselného formátu. Hlavní důvod této úpravy byl, že v jiných programech, např. MATLAB, se při importu dat nenahrály všechny hodnoty. Do souboru jsou ukládány X, Y, Z pole dat a celková výška skenovaného objektu.

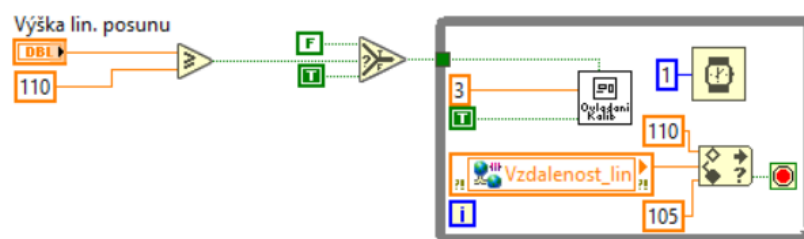
Jak již bylo zmíněno, formát *.STL je určen pro CAD systémy a pro 3D tisk. Pro export dat byla upravena a přepsána funkce programu MATLAB surf2stl.

Načítání dat

Uložena data nemohla být importována pomocí CLAUDIE_xlsx, protože tato knihovna není schopna načíst upravené soubory (číselný formát). Z toho důvodu byla použita ActiveX technologie, která je sice pomalejší, ale je schopna pracovat s upraveným souborem. Nevýhodou ActiveX technologií je nutnost mít nainstalovaný Microsoft Office pro jejich používání. Po úspěšném importu jsou data předána pomocí shift registru do podprogramu pro vykreslení dat.

Ukončení

Podprogram pro ukončení aplikace se nachází opět v CASE struktuře konzument smyčky a je umístěn do flat sekvence. Jako první se spustí subVI pro nastavení posuvné části lineárního posuvníku do výchozí pozice, viz Obr. 39. Nejdříve se porovná aktuální výška lineárního posunu s nastavenou výchozí pozicí. Pokud je větší, nastaví se směr na pohyb dolů. V opačném případě na pohyb vzhůru. Pokud aktuální výška spadá do zvoleného intervalu, dojde k ukončení smyčky WHILE a k posunu do další části podprogramu. V ní dojde k vypnutí laseru a krokových motorů. Poté dojde k vypnutí celé aplikace.



Obr. 39 SubVI pro posun lineárního posunu do výchozí pozice

6. Zhodnocení dosažených výsledků

6.1. Testování 3D skeneru

Pro testování přesnosti vytvořeného 3D skeneru byla porovnána data třech objektů s jejich naskenovanými kopiemi. První objekt byl změřen pomocí posuvného měřítka, druhý měl znám přesný průměr a poslední byl naskenován na skenu HandyScan – EXAscan od firmy SolidVision. Výsledná data byla porovnána s vytvořeným 3D skenerem. První se vypočítal aritmetický průměr naměřených dat (jak originálu, tak skenu). Z průměru byla spočítána absolutní a relativní chyba měření podle vzorců:

$$\bar{x}_{r,s}[mm] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (16)$$

$$\Delta x [mm] = \bar{x}_s - \bar{x}_r \quad (17)$$

$$\delta[\%] = \frac{\Delta x}{\bar{x}_r} \cdot 100 \quad (16)$$

- $\bar{x}_{r,s}$ – aritmetický průměr dat získaných posuvným měřítkem
- \bar{x}_s – aritmetický průměr naskenovaných dat
- Δx – absolutní chyba měření
- δ – relativní chyba měření

Na Obr. 40 lze vidět jak původní, tak naskenovaný objekt misky. Parametry skenu (u všech tří objektů byly stejné):

- rychlost otáčení kruhové platformy – půl otáčky za sekundu
- posun lineárního posunu – po jednom milimetru
- jedna otáčka na snímání

Lze vidět mírné zvlnění digitalizovaného objektu způsobené tím, že objekt byl lesklý. Pro přesnější měření mohly být nastaveny např. dvě otáčky na snímání. Původnímu objektu byl změřen na začátku (bod 1) průměr posuvným měřítkem. Byl proměřen jen tento bod, který je z hlediska přesnosti nejvhodnější z důvodu nulové výšky. Výsledná data se zprůměrovala a porovnála s naskenovaným objektem, jehož data byla zpracována z exportovaného *.xlsx souboru. Relativní chyba při měření průměru bodu 1 byla okolo 0,13 %.

Tabulka 6 Porovnání průměru prvního objektu s jeho skenem

	Originál Ø [mm]	Sken Ø [mm]
1	53,1	53,20
2	53,11	53,18
3	53,09	53,11
4	53,11	53,11
5	53,07	53,21
$\bar{x}_{r,s}[mm]$	53,09	53,16
$\Delta x [mm]$	0,07	
$\delta[\%]$	0,13	

Výšku předmětu nelze porovnat jen z poslední hodnoty Z souřadnice a naměřených hodnot reálného objektu, protože skenování začíná asi 1,5 mm od začátku předmětu a poslední tři hodnoty Z souřadnice jsou odstraněny z důvodu možných nesrovnalostí. Proto, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, se v podprogramu pro vykreslení dat ještě před odstraněním posledních tří řezů nahraje poslední hodnota Z souřadnice a přičte se k ní konstanta 1,5 (posunutí začátku skenování) pro získání přibližné výšky objektu. Porovnání výšek naskenovaného a reálného předmětu lze vidět v následující tabulce.

Tabulka 7 Porovnání výšky prvního objektu s jeho skenem

	Originál [mm]	Sken [mm]
1	79,51	79,35
2	79,57	79,65
3	79,53	79,15
4	79,52	79,45
5	79,56	79,05
$\bar{x}_{r,s} [mm]$	79,54	79,33
$\Delta x [mm]$	0,21	
$\delta [\%]$	0,26	



Obr. 40 Vlevo: původní objekt, vpravo: naskenovaný objekt ve formátu *.STL

Jako druhý předmět byla zvolena samotná otočná platforma s průměrem 100 mm. Byla naskenována 5krát a výsledky byly porovnány s originálem. Výsledky jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 8 Porovnání průměru druhého objektu s jeho skenem

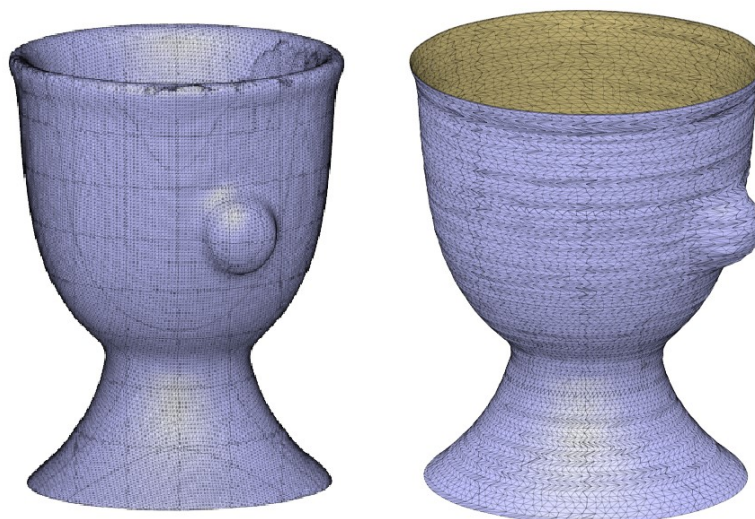
	Originál \varnothing [mm]	Sken \varnothing [mm]
1	100	99,92
2		100,08
3		99,95
4		99,98
5		99,93
$\bar{x}_{r,s} [mm]$	100	99,97
$\Delta x [mm]$	0,03	
$\delta [\%]$	0,03	

Třetí objekt byl naskenován na skenu HandyScan – EXAscan, viz Obr. 41. Jedná se o ruční laserový skener, který umožňuje vzájemný pohyb skeneru a tělesa během snímání. Snímání pomocí tohoto zařízení je založeno na principu pruhové laserové triangulace. Přesnost tohoto skeneru je 0,04 mm. Výstupem skenování byl formát *.STL, nebyl tedy přítomen soubor se samotným mrakem bodů, viz 1.1. Jako první byly objekty importovány do studentské verze programu AUTODESK FUSION 360. Objekt naskenovaný pomocí skeneru HandyScan – EXAscan obsahoval příliš mnoho prvků, tudíž z něj nemohlo být vytvořeno objemové těleso pro lepší proměření. V tomto programu nešly udělat řezy objektu pro provedení přibližného měření. Naskenované objekty byly tedy následně porovnány dvěma způsoby ve studentské verzi programu AUTODESK Netfabb Standart 2017. Jako první byly naskenované předměty importovány a bylo na nich provedeno celkem pět řezů, jejichž průměry byly mezi sebou porovnány, viz Tabulka 9. Tato metoda obsahuje značnou nepřesnost, protože řezy nemusely být provedeny ve stejné výšce každého tělesa, což je způsobeno posunutým počátkem skenování u vytvořeného skeneru.

Další metodou pro porovnání dvou skenů ve formátu *.STL pomocí programu AUTODESK Netfabb bylo využití funkce „Compare two meshes“. Pomocí této funkce se porovnají všechny vzdálenosti bodů překrytých objektů. Tato metoda porovnání již byla přesnější a průměrná absolutní chyba porovnávaných objektů byla 0,15 mm. Taky zde nastala chyba kvůli posunutého počátku skenování u vytvořeného skeneru, ale byla menší díky překrývání objektů, v důsledku čeho se přesně nastavil společný počátek.

Tabulka 9 Porovnání dvou skenerů, pomocí porovnávání řezů

Sken třetího předmětu		
Řezy	Vytvořený skener [mm]	HandyScan – EXAscan Ø [mm]
1	22,98	23,13
2	10,70	10,78
3	10,80	10,90
4	11,34	11,35
5	23,30	23,51
Δx_1 [mm]	0,15	
Δx_2 [mm]	0,088	
Δx_3 [mm]	0,10	
Δx_4 [mm]	0,015	
Δx_5 [mm]	0,21	
$\Delta \bar{x}$ [mm]	0,11	
δ_1 [%]	0,64 %	
δ_2 [%]	0,82 %	
δ_3 [%]	0,92 %	
δ_4 [%]	0,13 %	
δ_5 [%]	0,89 %	
$\bar{\delta}$ [%]	0,68 %	



Obr. 41 Vlevo: kalich naskenovaný pomocí skenu HandyScan – EXAscan, vpravo: kalich naskenovaný pomocí vytvořeného skeneru

6.2. Zhodnocení výsledků

Vypočítána absolutní chyba porovnání průměru prvního naskenovaného objektu (miska) s originálem byla přibližně 0,07 mm. Nelze tvrdit, že skener má takovou přesnost, protože první objekt byl proměřen pouze na jednom místě a mohla vzniknout chyba měření pomocí posuvného měřítka. Proto byly porovnány celkově tři objekty pro získání přibližné přesnosti skeneru. Oproti tomu absolutní chyba porovnání výšek byla přibližně 0,21 mm, což je malá chyba, uvaží-li se posunutý začátek skenování a ořezávání posledních tří řezů skenovaného objektu.

U otočné platformy (objekt dva) je znám její průměr. Proto je měření o poznání přesnější. Absolutní chyba je rovna 0,03 mm, což odpovídá odchylce v setinách milimetrů.

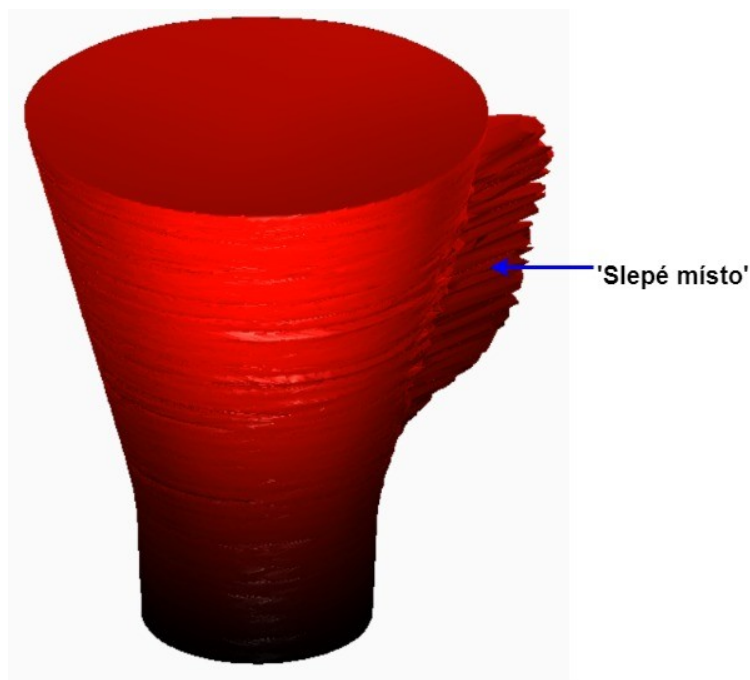
Poslední objekt byl naskenovaný pomocí vytvořeného skeneru a taky HandyScan – EXAscan skenerem. Výsledná data byla porovnána dvěma metodami. Průměrná absolutní chyba pomocí funkce „Compare two mesh“ programu AUTODESK Netfabb Standart 2017 byla rovná 0,15 mm. Průměrná absolutní chyba porovnáváním průměru řezů objektu pomocí zmíněného programu byla 0,11 mm.

Zprůměrováním všech vypočítaných absolutních chyb jednotlivých skenů vyšla hodnota 0,11 mm. Jedná se o přibližnou přesnost vytvořeného skeneru, nelze ale tvrdit, že při skenování každého objektu bude dosaženo této přesnosti. Důvodem může být nastavení jiných parametrů skenování, například jiné rychlosti otáčení karuselu. Taky záleží na lesku objektu a na jeho členitosti.

Vytvořený skener není schopen nasnímat náhodný objekt, protože ten může svým tvarem zakrývat určité oblasti, které 1D laserový senzor nemůže zaznamenat a tak vznikají tzv. slepá místa. Na Obr. 42 lze vidět sken hrnku. Vytvořený skener nemůže zaznamenat mezeru za uchem, protože snímač je umístěn kolmo k objektu. Tento problém řeší skener zmíněný v kapitole 2, ve kterém je objekt snímán dvěma senzory posunutými od sebe o úhel 90°.

Na Obr. 42 lze vidět mírné zvlnění plochy objektu. Objekt se skládá z jednotlivých řezů, které se postupně spojují. Nad sebou by měly být body s ideálně identickým úhlem, ale kvůli nepřesnosti

metody tomu tak není. Offset úhlu se maximálně pohybuje okolo 2° . To je způsobeno tím, že během snímání jednotlivých řezů není vždy detekován nultý úhel, viz Obr. 38 (požadované pulzy karuselu). První bod řezů může být tedy posunutý o zmíněný offset. Byla zkoušena metoda skenování, kdy se řez začal snímat, jen pokud byl aktuální úhel natočení otočné platformy roven nule, ale to razantně prodloužilo celkovou dobu skenování. Protože skener je převážně určen jako ukázka synchronizovaného řízení, a ne pro proces reverzního inženýrství, byla chyba mírného zvlnění zanedbána.



Obr. 42 Naskenovaný objekt se slepými místy

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat výukový model 3D skeneru. Model 3D skeneru může sloužit jako laboratorní úloha pro procvičování dílčích úloh procesu synchronizovaného řízení pohyblivých částí a jejich měření. Součástí práce je rozbor jednotlivých typů skenerů a zaměřuje se především na popis bezkontaktních typů. Vytvořený skener využívá laserového snímače pro měření poloměru předmětu, proto byl teoretický rozbor nápomocen při tvoření praktické části.

Další část práce obsahuje souhrn nejzajímavějších výzkumných projektů na téma 3D skenování. Cílem bylo najít skener, který řeší problém tzv. slepých míst. Toto řešení bylo v závěru diplomové práce převzato jako možné vylepšení vytvořeného skeneru.

Následujícím krokem bylo navržení a realizace mechanické konstrukce, která splňuje požadavky jak na velikost, tak na přenositelnost. Skener využívá dvou krokových motorů. První z nich otáčí platformou s připevněným objektem. Druhý ovládá lineární posuv, na který je připevněn laserový snímač vzdálenosti. Díky těmto motorům může senzor nasnímat celý předmět. Sběr a zpracování signálu řídí platforma NI myRIO 1900, která obsahuje FPGA, které je ideální pro řízení krokových motorů.

Nejdůležitější částí diplomové práce byl návrh a realizace celé SW aplikace, která byla naprogramována v prostředí LabVIEW. Hlavním úkolem aplikace je řízení FPGA a Real – Time části pro skenování požadovaného 3D objektu. V průběhu skenování se vykresluje graf řezu skenovaného objektu a jeho tvořený 3D model. Součástí aplikace je kalibrace pro nastavení lineárního posuvu na začátek skenování, a taktéž export dat do formátu *.xlsx a *.STL. Program je maximálně uživatelsky přívětivý, jeho součástí je i manuální nastavení počátku snímání a možnost změny parametrů skenu. Vytvořený skener je ve výsledku samostatné přenositelné zařízení.

Posledním krokem bylo otestování vytvořeného skeneru. Byla porovnána data na třech různých objektech. První objekt byl změřen pomocí posuvného měřítka, druhý měl znám přesný průměr a poslední byl naskenován na skenu HandyScan – EXAscan od firmy SolidVision. Přibližná přesnost skeneru je rovna 0,11 mm, což je dostačující, protože je určen jako ukázka synchronizovaného řízení, a ne pro proces reverzního inženýrství.

Vytvořený skener by se dal v budoucnu rozšířit o další senzor, který by byl umístěn v přesně známé vzdálenosti od prvního senzoru. Díky tomu by se vyřešil problém tzv. slepých míst. Pro naskenování vrcholu předmětů by stačilo senzor naklonit, v tom případě by toto místo bylo možné naskenovat. Další možné zlepšení přesnosti skenování by bylo využití digitálního výstupu senzoru pomocí standardu RS422, což bylo bráno v potaz při návrhu DPS pro propojení platformy myRIO-1900 s hardwarovými komponentami. Součástí DPS je šroubovací svorkovnice pro možnost budoucího připojení převodníku RS422.

Skener může být v budoucnu rozšířen o možnost vypočítání objemu snímaného předmětu. Taktéž může být implementován algoritmus pro vypočítání ideálního tělesa z naskenovaného předmětu.

Zdroje

- [1] 3D-skenování. CAD [online]. 2014 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2851-3d-skenovani.html>
- [2] 3D skenování. 3D scan [online]. V Brně: SolidVision, 2014 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>
- [3] Technologie skenování ve 3D. SPSKS [online]. 2007 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.spsks.cz/wp-content/uploads/2016/03/Technologie-skenov%C3%A1n%C3%AD-ve-3D-0.pdf>
- [4] Využití 3D skenování v lékařství. Skenování ve 3D [online]. V Brně: ABBAS, 2014 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/skenovani/kde-skener-vyuzit/lekarstvi/>
- [5] MAKERBOT DIGITIZER. In: WIZE 3D [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.wize3d.com/wp-content/uploads/2015/11/hero.png>
- [6] REVERSE ENGINEERING. In: Department of reverse engineering and additive technologies [online]. V Brně: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/reverse-engineering/>
- [7] 3D Scanning. In: Halo Li [online]. USA: University of Southern California Department of Computer Science, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.hao-li.com/cs599-ss2015/slides/Lecture04.2.pdf>
- [8] Měřicí stroje souřadnicové. In: WHP technik [online]. V Brně: WHP TECHNIK s.r.o, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.whp.cz/merici-stroje-souradnicove.html>
- [9] 3d scanner cnc abtaster. In: CNC plus [online]. Německo, 2014 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://cnc-plus.de/images/product_images/info_images/3d-scanner-cnc-abtaster.jpg
- [10] Industrial CT. In: HAMAMATSU [online]. Hamamatsu Photonics K.K [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://www.hamamatsu.com/us/en/community/xndt/app-industrial/industrial_ct.html
- [11] Digitalizace - její princip a rozdělení. MM [online]. Praha: MM publishing [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [12] HandySCAN 3D Scanning of a turbo. In: EMS-USA [online]. USA [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: https://www.ems-usa.com/wp-content/gallery/handyscan/EMS_HandySCAN_Turbo_1.jpg

- [13] Optické metody měření 3D objektů. Elektro revue [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2005 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [14] Parts of a Stereo Vision System. Austin, Texas: National Instruments [online]. USA [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916T-01/nivisionconcepts/stereo_parts_of_a_stereo_vision_system/
- [15] Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. Automatizace.HW [online]. Praha [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [16] MS-krokové motory. VSB [online]. Ostrava [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hav278/Mechatronicke_systemy/Studijni_opory/Struktury_s_KM.pdf
- [17] USER MANUAL NI ISM-7400. Austin, Texas: National Instruments [online]. USA [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374105a.pdf>
- [18] USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI myRIO-1900 [online]. Austin, Texas: National Instruments, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-1166/lang/cs>
- [19] Introduction to myRIO. TEP [online]. Lahore [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-myrio.html>
- [20] The LabVIEW RIO Architecture: A Foundation for Innovation [online]. Austin, Texas: National Instruments, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/10894/en/>
- [21] Using NI CompactRIO Scan Mode with NI LabVIEW Software [online]. Austin, Texas: National Instruments, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/7338/en/>
- [22] OptoNCDT 1320. MICRO-EPSILON [online]. Ortenburg: Micro-Epsilon, 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man--optoNCDT-1320--en.pdf>
- [23] REYES, Arnulfo, Jesús CERVANTES a Nereyda GUTIÉRREZ. Low Cost 3D Scanner by Means of a 1D Optical Distance Sensor. Procedia Technology [online]. 2013, 2013(Volume 7), 223-230 [cit. 2018-03-18]. ISSN 2212-0173. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313000297?via%3Dihub#bibl0005>
- [24] HADIYOSO, Sugondo, G Teguh MUSAHARPA a Inung WIJAYANTO. Prototype implementation of dual laser 3D scanner system using cloud to cloud merging method. In: 2017 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 36-40 [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1109/APWiMob.2017.8284001. ISBN 978-1-5386-2373-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8284001/>

- [25] GUTIERREZ-VILLALOBOS, Jose M., Talavera-Velazquez DIMAS a Julio C. MORA-VAZQUEZ. Simple and low cost scanner 3D system based on a Time-of-Flight ranging sensor. In: 2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-5 [cit. 2018-03-22]. DOI: 10.1109/CONIIN.2017.7968193. ISBN 978-1-5386-1694-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7968193/>
- [26] BITTER, Rick., Taqi. MOHIUDDIN a Matt. NAWROCKI. LabView advanced programming techniques. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, c2007. ISBN 0-8493-3325-3.
- [27] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. Začínáme s LabVIEW. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [28] WITTASSEK, Tomáš. Virtuální instrumentace I: učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3395-8.
- [29] ERTUGRUL, Nesimi. LabVIEW for electric circuits, machines, drives, and laboratories. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2002. ISBN 0130618861.

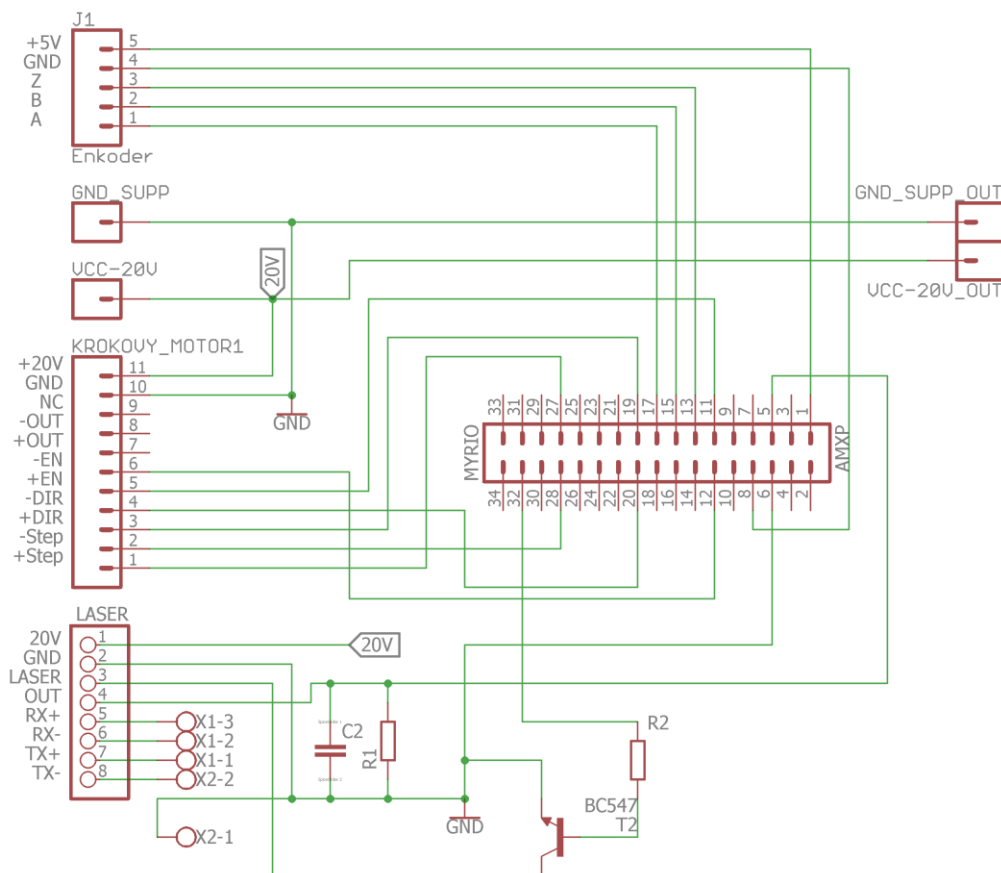
Seznam příloh

Příloha 1 Obsah přiloženého CD.....	65
Příloha 2 Schéma připojení konektoru MXP A platformy myRIO-1900 s hardwarovými komponenty	66
Příloha 3 Schéma připojení konektoru MXP B platformy myRIO-1900 s hardwarovými komponenty	67

Příloha 1 Obsah přiloženého CD

1. Program pro vytvoření 3D skener (Vyukovy3Dskener.zip)
2. Diplomová práce (HAL0106_FEI_N2649_2612T041_2018.pdf)

Příloha 2 Schéma připojení konektoru MXP A platformy myRIO-1900 s hardwarovými komponenty



Příloha 3 Schéma připojení konektoru MXP B platformy myRIO-1900 s hardwarovými komponenty

